

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра геофизики и геоинформационных технологий

Ш.З.ИБРАГИМОВ

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЯДЕРНОЙ
ГЕОФИЗИКЕ**

Учебно-методическое пособие

Казань-2014

Научный редактор
доктор геол.-мин. наук, проф. КФУ
А.С.Борисов

Рецензенты:
канд. геол.-мин.наук, доц. КФУ **Д.И.Хасанов**
канд. геол.-мин.наук, доц. КФУ **И.Ю.Чернова**

Ибрагимов Ш.З.

Лабораторные работы по ядерной геофизике: Учебно-методическое пособие/ Ш.З.Ибрагимов. – Казань: Казанский университет, 2014. – 80 с.

Представлены пять лабораторных работ по различным разделам курса "Ядерная геофизика". Первые две работы посвящены теоретическим основам радиометрии (закон распада и радиоактивные равновесия; взаимодействие гамма-квантов с веществом). Три работы - изучение аппаратуры, методики работ и интерпретации результатов для проведения радиометрической и ядерно-физической съемки. В каждой работе дается физическое обоснование методов, приведены контрольные вопросы.

Принято на заседании кафедры геофизики и
геоинформационных технологий
Протокол № 4 от 27 января 2014 года

©Казанский федеральный университет, 2014

©Ибрагимов Ш.З., 2014

Содержание

Работа 1. Закон радиоактивного распада и равновесия	5
Физические основы	5
Задания	8
Работа 2. Взаимодействие гамма-квантов с веществом	11
Физические основы	11
Задания	15
Работа 3. Радиометр СРП-68. Интерпретация результатов гамма-съемки	16
Физические основы радиометрии	16
Радиометр СРП-68	21
Блок-схема интегрального радиометра	21
Технические характеристики радиометра	24
Погрешности при радиометрических измерениях	24
Измерения с радиометром СРП-68	26
Задания по прибору СРП-68 и интерпретации данных гамма -съемки	27
Контрольные вопросы	29
Литература	29
Работа 4. Изучение гамма-спектрометра ГАММА-1С, лаборатор- ное определение содержания естественных радиоактивных элементов в пробах	30
Естественная радиоактивность горных пород	30
Сцинтилляционные детекторы, особенности использования сцинтилляционных детекторов при гамма-спектрометрии	33
Основы количественного определения содержания естественных радиоактивных элементов горных пород	36
Устройство гамма-спектрометра ГАММА-1С	38
Порядок работы с гамма-спектрометром ГАММА-1С	42
Программное обеспечение ГАММА-1С	43
Запуск программы	43
Назначение Главного окна программы	44
Описание функций Анализатора	55
Назначение функций правой и левой клавиши мыши	56
Назначение вспомогательных кнопок	61
Вызов ранее измеренных спектров	61

Задание по лабораторной работе	62
Контрольные вопросы	62
Литература	62
Работа 5. Изучение портативного рентгеновского флуоресцентного анализатора Bruker Turbo S1, определение содержания рудного компонента в пробах	63
Физические основы метода	63
Поглощение γ -квантов электронами атомов. Фотоэффект	63
Характеристическое излучение элементов	64
Физические основы рентген-радиометрического метода	67
Устройство анализатора Turbo S1	71
Радиационная безопасность при работе с прибором	72
Основные компоненты анализатора Turbo S1	75
Запуск анализатора, выбор режимов измерения	77
Проведение измерения	83
Задание по лабораторной работе	86
Контрольные вопросы	86
Литература	87

Работа 1. Законы радиоактивного распада и радиоактивные равновесия

Физические основы

Теория радиоактивного распада основана на том, что распад каждого отдельного атома можно рассматривать как явление случайное, не зависящее от внешних условий.

Число атомов, распадающихся за малый промежуток времени dt , пропорционально наличному числу атомов N . При условии, что в начальный момент при $t = 0$ число атомов равно N_0 , а по прошествии времени t число атомов равно N , получаем основное уравнение радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Это уравнение показывает, сколько атомов останется нераспавшимися по истечении времени t из начального числа атомов N_0 .

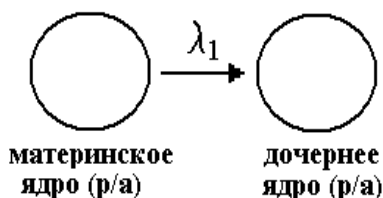
Для характеристики радиоэлемента часто пользуются следующими постоянными: λ - постоянная распада, T - период полураспада изотопа, т. е. время, в течение которого распадается половина всех имеющихся атомов; τ - средняя продолжительность жизни атома данного радиоактивного изотопа. Соотношения между λ , T и τ имеют следующий вид:

$$\lambda T = \ln 2 = 0,693;$$

$$\lambda \tau = 1.$$

Для приближенных расчетов следует помнить, что величина $t = 10T$ представляет собой время практически полного распада радиоэлемента, так как по истечении этого времени останется меньше 0,1% первоначального числа атомов.

Радиоактивный изотоп, распадаясь, может дать начало новому радиоэлементу.



Количество накапливающегося со временем второго радиоэлемента может быть рассчитано по формуле:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} e^{-\lambda_2 t} \quad (2)$$

Второй член в уравнении (2) представляет собой то число атомов второго элемента, которое осталось к моменту времени t от начального числа атомов этого элемента, если последнее не равнялось нулю. Этот

член уменьшается по простому показательному закону. Первый член вначале равен нулю, затем, в момент времени t_m , проходит через максимум и далее уменьшается по закону, который в пределе соответствует скорости убывания того из двух показательных членов, для которого λ меньше.

Для случая n последовательно распадающихся радиоэлементов число атомов n -го вещества N_n будет суммой членов

$$N_n = N_{n1} + N_{n2} + N_{n3} + \dots + N_{n,n-1} + N_{n,n} \quad (3)$$

В предположении, что в начальный момент времени имелось только первое (материнское) вещество, количество n -го вещества в любой момент времени t определяется:

$$N_n = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1} N_{01} \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_n - \lambda_1)(\lambda_{n-1} - \lambda_1) \dots (\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_n - \lambda_2)(\lambda_{n-1} - \lambda_2) \dots (\lambda_1 - \lambda_2)} + \dots + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_{n-1} - \lambda_n)(\lambda_{n-2} - \lambda_n) \dots (\lambda_1 - \lambda_n)} \right) \quad (4)$$

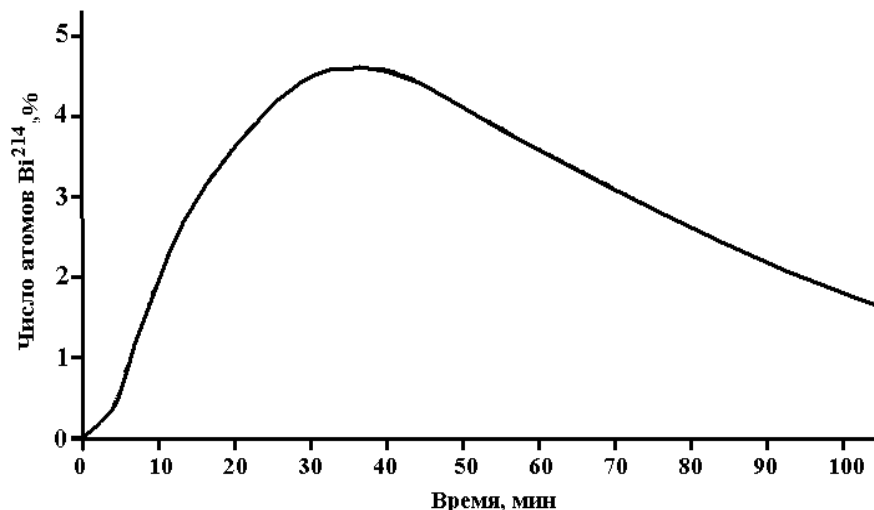


Рис.1. Изменение количества Bi^{214} в процессе радиоактивного распада цепочки Po^{218} ($T=3$ мин) – Pb^{214} ($T=27$ мин) – Bi^{214} ($T=20$ мин).

На рис.1 изображена кривая изменения количества Bi^{214} , являющегося третьим из последовательно превращающихся веществ (Po^{218} – Pb^{214} – Bi^{214}), причем в начальный момент присутствует только первое вещество.

Из формул, представленных выше видно, что число атомов первого и последующих радиоэлементов в ряду превращений зависит от соотношения между постоянными их распада.

Если период полураспада материнского вещества настолько велик, что распадом его можно пренебречь по сравнению с распадом его производных ($\lambda_1 \ll \lambda_2$, $\lambda_1 \ll \lambda_3$ и т. д.), то в ряду радиоактивных элементов возникает состояние, называемое вековым или устойчивым радиоактивным равновесием. В этом случае числа распадающихся в единицу времени атомов всех элементов одинаковы. Математически состояние устойчивого равновесия выражается соотношением:

$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 = \dots = N_n\lambda_n \quad (5)$$

Так, радий по прошествии одного месяца приходит в равновесие с радоном и его производными, и активность системы становится практически постоянной. Графически состояние устойчивого равновесия изображено на рис. 2.

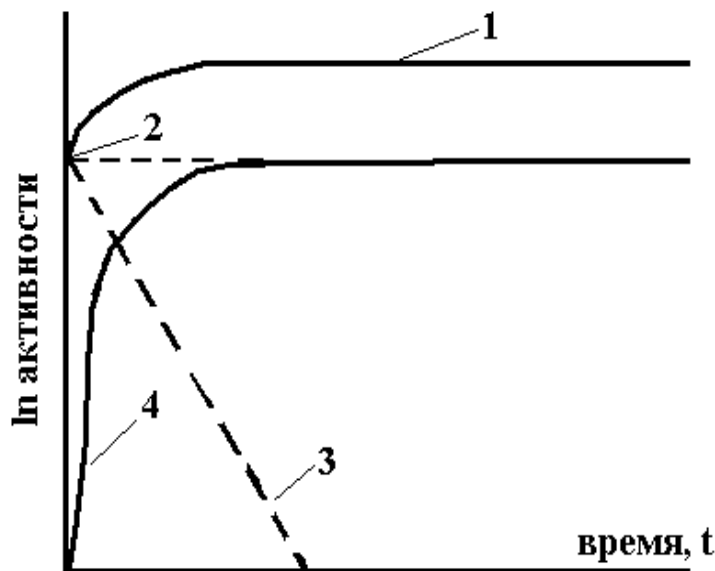


Рис.2. Состояние устойчивого равновесия.

1 - полная активность материнского вещества в смеси с дочерним;

2, 3 - активности изолированных веществ: материнского (2) и дочернего (3);

4 - полная активность дочернего вещества в смеси с материнским.

Если постоянные распада элементов в ряду радиоактивных превращений соизмеримы по величине, но последующее вещество более короткоживущее, чем исходное, то для радиоактивной цепи, состоящей из n звеньев, справедлива формула:

$$N_1\lambda_1\lambda_2\dots\lambda_n = N_n(\lambda_n - \lambda_1)(\lambda_{n-1} - \lambda_1)\dots(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (6)$$

Это состояние радиоактивного равновесия называется подвижным равновесием. Суммарное количество материнского вещества и его производных в этом случае уменьшается с периодом полураспада, характерным для материнского вещества. Графически состояние подвижного равновесия изображено на рис.3, где рассматривается

состояние равновесия между радоном и короткоживущими продуктами его распада.

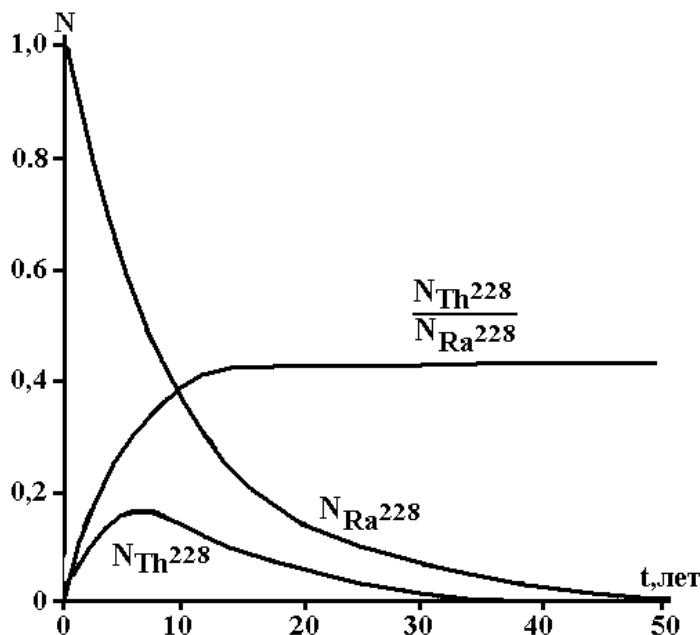


Рис.3. Состояние подвижного равновесия.

Элемент Ra^{226} обладает периодом полураспада $T = 6,7$ лет, Th^{228} с $T = 2$ года.

Частным случаем является подвижное равновесие двух веществ ($\lambda_1 > \lambda_2$), математическое выражение которого имеет вид:

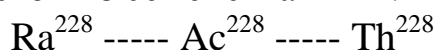
$$N_2/N_1 = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (7)$$

В состоянии подвижного равновесия количество атомов материнского и дочернего веществ убывает, но отношение числа распадающихся атомов дочернего вещества к числу распадающихся атомов материнского вещества, как видно из формулы (7), есть величина постоянная.

Для случая двух веществ, при соотношении $\lambda_1 > \lambda_2$, в пределе остается лишь дочернее вещество, материнское вещество полностью распадается.

Задания

Задача 1. Доказать, что если между двумя радиоактивными элементами в ряду распада находится короткоживущий элемент, то для достаточно большого времени при расчетах можно принимать, что третий элемент образуется непосредственно из первого. В качестве примера взять участок из семейства Th^{232} :



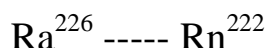
Периоды полураспада: $\text{Ra}^{226} = 6,7$ лет; $\text{Ac}^{228} = 6,1$ часа; $\text{Th}^{228} = 1,9$ лет.

Ход решения:

а) написать уравнение накопления второго элемента для системы из двух радиоактивных изотопов;

- б) рассчитать постоянные распада λ для каждого элемента;
- в) составить уравнение накопления для третьего элемента;
- г) проанализировать данное уравнение накопления и доказать, что для времени t , большего на порядок самого большого периода полураспада ($t = 10T_{Ra}$), выполняется исходное предположение.

Задача 2. Рассчитать время установления устойчивого равновесия и построить графики накопления для системы из радиоактивного семейства U^{238} :

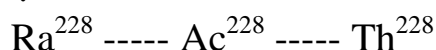


Периоды полураспада: $Ra^{226} = 1620$ лет; $Rn^{222} = 3,8$ суток

Ход решения:

- а) проверить, удовлетворяет ли данная система условию устойчивого равновесия;
- б) написать условие устойчивого равновесия для данной системы;
- в) написать уравнение накопления второго элемента, при условии, что при $t=0$ второй элемент системы отсутствовал;
- г) с точностью 0.1% определить время установления устойчивого равновесия в данной системе;
- д) построить графики активности во времени первого и второго элементов, оценить по построенному графику время наступления устойчивого равновесия, сопоставить время с расчетным значением. Принять при $t = 0$ $N_{Ra0} = 1$.

Задача 3. Рассчитать время установления подвижного равновесия и построить графики накопления для системы из радиоактивного семейства Th^{232} :



Периоды полураспада: $Ra^{228} = 6,7$ лет; $Ac^{228} = 6,1$ часа; $Th^{228} = 1,9$ лет.

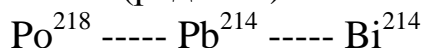
Ход решения:

- а) оценить, при каких условиях происходит накопление третьего элемента (см. задачу 1);
- б) написать условие подвижного равновесия для данной системы;
- в) написать уравнение накопления третьего, при условии, что при $t=0$ второй и третий элементы отсутствовали;
- г) с точностью 0.1% определить время установления подвижного равновесия в данной системе;

д) построить графики активности во времени первого и третьего элементов в отдельности;

е) построить график отношения содержаний первого и третьего элементов, оценить по нему время наступления подвижного равновесия, сопоставить время с расчетным значением.

Задача 4. Рассчитать и построить графики убыли первого и накоплений второго и третьего элементов системы радиоактивных элементов (ряд U^{238}):



Периоды полураспада: $Po^{218} = 3$ минуты; $Pb^{214} = 27$ минут; $Bi^{214} = 20$ минут.

Работа 2. Взаимодействие гамма-квантов с веществом

Физические основы

Гамма-излучение представляет собой кванты электромагнитного излучения с длиной волны порядка $n \cdot 10^{-11}$ см. Гамма-кванты излучаются ядрами, находящимися в возбужденном состоянии после испускания α - и β - частиц. Энергия γ - квантов равна $h\nu$, где h - постоянная Планка, равная $6,63 \cdot 10^{-27}$ эрг*сек, а ν - частота колебаний ($\nu = c/\lambda$, где c - скорость света, λ - длина волны). Спектр энергии γ - излучения, испускаемого одним и тем же веществом, линейчатый. Энергии γ - излучения естественных радиоэлементов изменяются в пределах от 0,02 до 2,62 Мэв.

Проникающая способность γ - квантов велика. Их пробег в воздухе может достигать нескольких сот метров. Гамма-кванты способны проходить через слой твердого вещества в несколько десятков сантиметров. Проходя через вещество, γ - излучение испытывает ослабление в результате следующих основных явлений:

1. комптоновского рассеяния;
2. фотоэффекта;
3. образования пар.

Комптоновское рассеяние. При взаимодействии γ - излучения с энергией $0,5 < E < 2,5$ Мэв с легкими веществами преобладает явление рассеяния. В результате рассеяния γ - квант, сталкиваясь с электроном, теряет часть своей энергии и изменяет направление движения. Изменение энергии γ - кванта с начальной энергией E_0 в случае комптоновского рассеяния может быть выражено формулой

$$E_{\gamma} = \frac{E_{\gamma 0}}{1 + \frac{E_{\gamma 0}}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

где E_{γ} - энергия рассеянного кванта;

$E_{\gamma 0}$ - энергия первичного кванта

m_0 - масса покоящегося электрона;

c - скорость света;

θ - угол между падающим и рассеянным квантами.

Явление комптоновского рассеяния на электроне характеризуется коэффициентом σ_e . Величина коэффициента рассеяния, рассчитанная на

один атом, пропорциональна концентрации электронов в единице объема поглощающего вещества

$$\sigma_a = \sigma_e \rho L Z (1/A)$$

где σ_e - коэффициент рассеяния, отнесенный к одному электрону;

ρ - плотность поглощающего вещества;

L - число Авогадро;

Z — порядковый номер элемента;

A — атомный вес.

Если известна величина коэффициента рассеяния σ_a для свинца, которая приводится обычно в таблицах, то для любого элемента

$$\sigma_a = \sigma_{aPb} \frac{\rho}{11,3} \cdot \frac{207,2}{A} \cdot \frac{Z}{82}$$

Фотоэффект. Для мягкого γ - излучения преобладающим видом взаимодействия с тяжелыми веществами является фотоэффект, характеризующийся коэффициентом поглощения τ . В результате этого явления γ - квант полностью отдает свою энергию электрону. Энергия γ - кванта E распределяется в соответствии с формулой

$$E = E_0 + \frac{mv^2}{2}$$

где E_0 — энергия, затрачиваемая на вырывание электрона из электронной оболочки;

$mv^2/2$ - кинетическая энергия электрона.

Коэффициент τ выражает долю квантов, поглощаемых на единице пути в веществе. Величина коэффициента поглощения пропорциональна числу атомов поглощающего вещества в 1 см^3 и, отнесенная к одному атому, выражается следующей формулой:

$$\tau_a = a \left(\frac{1}{E} \right)^{2,8} Z^4$$

где a — постоянная.

Полный коэффициент поглощения в данном веществе

$$\tau = \tau_a \frac{\rho L}{A}$$

Если известна величина коэффициента τ для свинца, то для любого элемента

$$\tau = \tau_{\text{Pb}} \frac{\rho}{11,3} \cdot \frac{207,2}{A} \cdot \left(\frac{Z}{82} \right)^4$$

Образование пар. Для γ - квантов с энергией, большей 1,02 Мэв, при взаимодействии с тяжелыми веществами может происходить образование пар электрон - позитрон. Это явление не имеет существенного значения для естественных радиоактивных элементов, у которых энергия меньше 3 Мэв.

Ослабление γ - излучения в веществе целом характеризуется коэффициентом, учитывающим оба описанных выше явления, называемым коэффициентом ослабления

$$\mu = \sigma + \tau$$

По аналогии с σ и τ , коэффициент поглощения может быть рассчитан для определенной энергии гамма - излучения на один атом вещества (μ_a) и на вещество в целом (μ);

$$\mu = \frac{\mu_a \rho L}{A}$$

где ρ - плотность поглощающего вещества;

L - число Авогадро;

A — атомный вес.

Ослабление γ - излучения в веществе и происходит по показательному закону

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

где I_0 – первичная интенсивность γ - излучения,

μ - коэффициент ослабления γ – излучения,

d – толщина поглощающего слоя.

Показательный закон поглощения достаточно хорошо соблюдается для узкого пучка лучей, выделенного с помощью диафрагмы, при котором создаются условия для однократного рассеяния гамма-квантов в веществе.

В практике радиометрических измерений в большинстве случаев приходится иметь дело с излучением объемных источников, которые характеризуются не только первичными, но и рассеянными γ - квантами с различной энергией.

Создание строгой теории прохождения такого излучения через вещество встречает большие математические трудности. Для оценки поглощения γ –излучения в веществе чаще используют функцию Кинга, которая рассчитана для широкого пучка с многократным рассеянием и

последующим поглощением гамма - квантов. Многие задачи для расходящихся пучков γ - квантов решаются при помощи соответствующих опытов на моделях.

Коэффициент μ возрастает с увеличением плотности вещества в большинстве случаев по линейному закону, поэтому практически имеет место соотношение

$$\frac{\mu}{\rho} \approx \text{const}$$

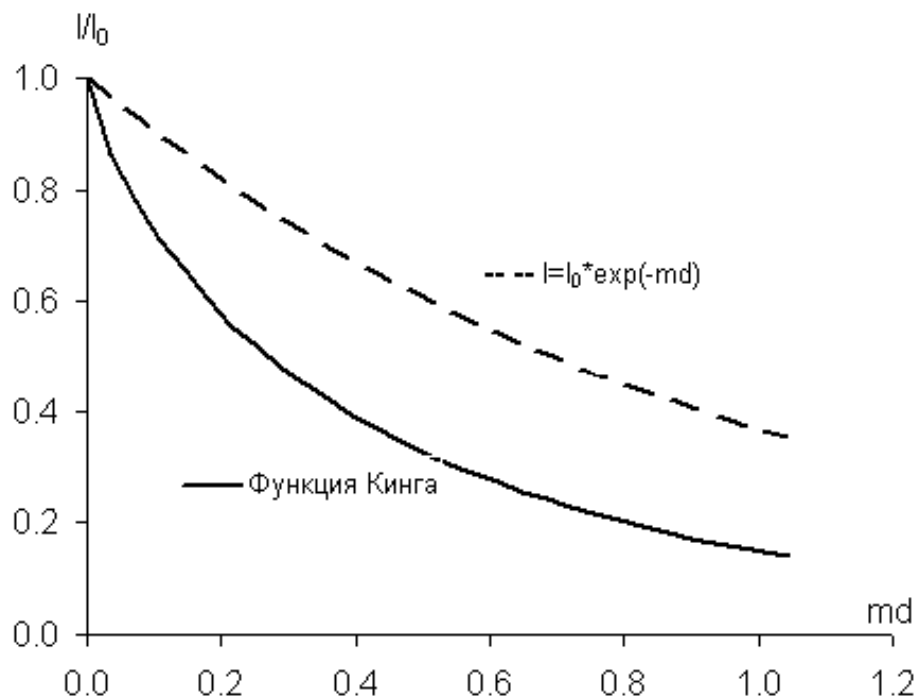


Рис.4.
Поглощение
гамма-квантов,
описываемые
разными
функциями.

Для характеристики интенсивности γ -излучения с энергией до 3 МэВ часто используют поглощенную дозу или ионизирующую способность в воздухе. Такой частный случай поглощенной дозы (для γ -излучения в воздухе) принято называть экспозиционной дозой (или дозой) излучения. Она выражается отношением суммарного электрического заряда ионов одного знака, образованного излучением, поглощенным в некоторой массе сухого воздуха, к этой массе.

Единицей дозы излучения является рентген (Р). Один рентген соответствует поглощению такого количества рентгеновского или гамма-излучений, которое в 1 см³ сухого воздуха при температуре 0⁰С и давлении 760 мм (0,001293 г воздуха) образует ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака ($2,083 \cdot 10^9$ пар ионов). Энергетический эквивалент рентгена: 1Р = 88 эрг или $5,5 \cdot 10^7$ Мэв поглощенной энергии в 1 г воздуха ($0,88 \cdot 10^{-2}$ Дж в 1 кг воздуха). Доза, образуемая излучением в единицу времени, называется мощностью дозы и выра-

жается в рентгенах в час (Р/ч), а также в производных единицах: мР/ч и мкР/ч.

Мощность дозы, создаваемая источником γ -излучения в изотропной среде без учета поглощения, например в воздухе, описывается выражением:

$$P = \frac{KQ}{r^2}, \text{ где}$$

K – γ -постоянная радиоактивного источника, зависит от вещества источника: для Ra $K=8,4 \cdot 10^9$; урана $K=10^7$; для Co^{60} $K=1,3 \cdot 10^7$ [(мкр/час)*см²]/кюри

Q – активность источника в Ки (кюри), 1 г Ra^{226} имеет активность 1 Ки и испускает $3,7 \cdot 10^{10}$ γ /сек.

r – расстояние от источника до точки наблюдения.

Естественная радиоактивность пород обусловлена присутствием в них радиоактивных элементов рядов урана и тория и калия-40. Для упрощения расчетов, вводятся понятия уранового эквивалента ε : для равновесного ряда урана он равен $\varepsilon_U = 1$, для ряда тория $\varepsilon_{Th} = 0,43$ и для калия-40 $\varepsilon_K = 2 \cdot 10^{-4}$. Зная урановые эквиваленты, содержания радиоактивных элементов можно пересчитать в эквивалентное содержание равновесного урана.

Задания

Задача 1. Рассчитать значение линейного коэффициента поглощения квантов радия в свинце, если известно значение коэффициента поглощения на атом $\mu_a = 23,45 \cdot 10^{-24}$ см²/атом. Плотность свинца 11,3 г/см³; атомный вес свинца 207; число Авогадро равно $6,02 \cdot 10^{23}$.

Задача 2. Рассчитать изменение узкого пучка гамма – излучения с энергией 1,02 Мэв после прохождения его через свинцовый экран толщиной 1 см. Значение коэффициента поглощения свинца взять из предыдущей задачи.

Задача 3. Узкий пучок гамма – квантов с энергией 2 Мэв направлен на свинцовую пластину. Чему равна толщина x пластины, если интенсивность пучка уменьшается в 10 раз? Известно, что ослабление интенсивности этого пучка в два раза происходит при толщине пластины 1,4 см.

Задача 4. Рассчитать мощность дозы γ -излучения точечного источника в воздухе (в мкр/час) на расстоянии 1 м от детектора, если на расстоянии 2 м от приемника его измеренная активность равна 100 имп/мин. Точечный источник, содержащий 0,14 мг Ra^{226} и помещенный на то же расстояние, дает показание 230 имп/мин.

Задача 5. Рассчитать расстояния от точечного источника Ra^{226} активностью 25 мКи до интегрального радиометра для эталонировки радиометра. Максимальное значение мощности дозы – примерно 20 мР/час, минимальное значение – примерно в два раза выше натурального фона (примерно 15 мкР/час). Между max и min значениями должно быть равномерно распределено 8 – 10 мощностей доз

Работа 3. Радиометр СРП-68. Интерпретация результатов γ -съемки

Физические основы радиометрии

Ослабление (поглощение) γ - излучения в породах характеризуется коэффициентом поглощения μ , учитывающим как рассеяние γ -квантов, так и фотоэлектрическое поглощение их. Таким образом, коэффициент μ отражает взаимодействие гамма-квантов со средой.

Коэффициент поглощения μ может быть рассчитан для определенной энергии гамма - излучения на один атом вещества (μ_a) и на вещество в целом (μ);

$$\mu = \frac{\mu_a \rho L}{A}$$

где ρ - плотность поглощающего вещества; L - число Авогадро; A – атомный вес.

Ослабление γ - излучения в веществе и происходит по показательному закону

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

где I_0 – первичная интенсивность γ - излучения,
 μ – линейный коэффициент ослабления γ -излучения,
 d – толщина поглощающего слоя.

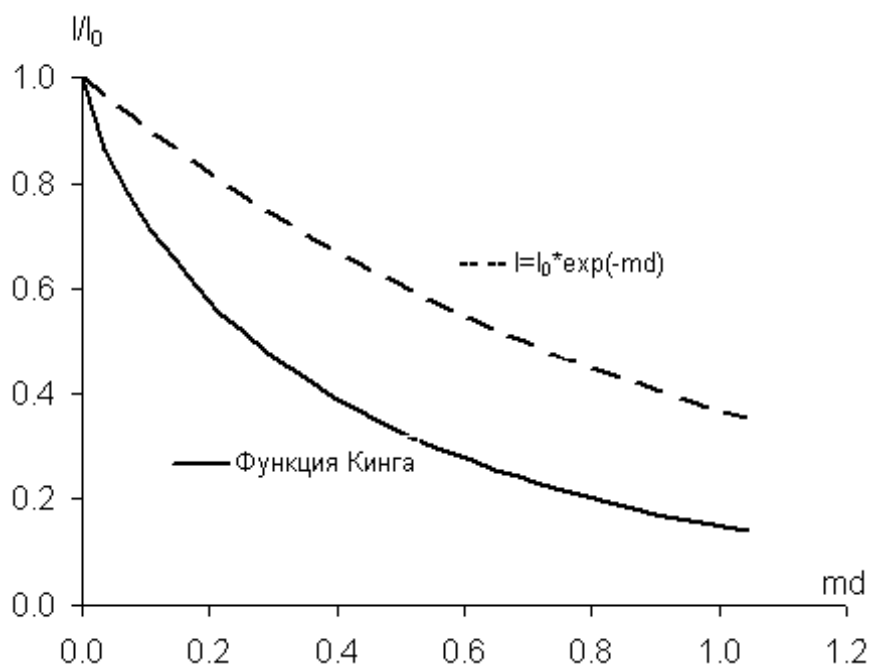


Рис.5.
Поглощение гамма-квантов, описываемые разными функциями.

Показательный закон поглощения достаточно хорошо соблюдается для узкого пучка лучей, выделенного с помощью диафрагмы, при котором создаются условия для однократного рассеяния гамма-квантов в веществе.

В практике радиометрических измерений в большинстве случаев приходится иметь дело с излучением объемных источников, которые характеризуются не только первичными, но и рассеянными γ -квантами с различной энергией. Создание строгой теории прохождения такого излучения через вещество встречает большие математические трудности. Для оценки поглощения γ -излучения в веществе чаще используют функцию Кинга, которая рассчитана для широкого пучка с многократным рассеянием и последующим поглощением гамма-квантов. Многие задачи для расходящихся пучков γ -квантов решаются при помощи опытов на моделях.

Коэффициент μ возрастает с увеличением плотности вещества в большинстве случаев по линейному закону, поэтому для вмещающих пород, где $Z_{эфф}$ колеблется в узком диапазоне, соблюдается соотношение

$$\frac{\mu}{\rho} \approx 0.032$$

Другой мерой, характеризующей взаимодействие радиоактивных излучений с веществом, является поглощенная доза.. Чаще используется мощность поглощенной дозы P , единица измерения которой – Рентген в час ($P/ч$, $mP/ч$ или $\mu P/ч$). Мощность дозы P , создаваемая источником γ -излучения в изотропной среде без учета поглощения, например в воздухе, описывается выражением:

$$P = \frac{KQ}{r^2},$$

где

Q – активность источника в Ки (кюри), 1 г Ra^{226} имеет активность 1 Ки и испускает $3,7 \cdot 10^{10}$ γ /сек.

r – расстояние от источника до точки наблюдения.

K – γ -постоянная радиоактивного источника, зависит от вещества источника: для Ra $K=8,4 \cdot 10^9$; урана $K=10^7$; для Co^{60} $K=1,3 \cdot 10^7$ [(мкр/час)*см²]/кюри.

Естественная радиоактивность пород обусловлена присутствием в них радиоактивных элементов рядов урана и тория и калия-40. Для упрощения расчетов, вводятся понятия уранового эквивалента ϵ : для равновесного ряда урана он равен $\epsilon_U = 1$, для ряда тория $\epsilon_{Th} = 0,43$ и для калия-40 $\epsilon_K = 2 \cdot 10^{-4}$.

Зная урановые эквиваленты, содержания радиоактивных элементов можно пересчитать в эквивалентное содержание равновесного урана.

Интенсивность γ -излучения на поверхности радиоактивного пласта бесконечного простирания (вертикального штока) описывается выражением:

$$I_0 = \frac{2\pi K Q \rho}{\mu_{eff}} \text{ (мкр/час)}$$

где Q – содержание урана в пласте [г(U) / г(породы)];

μ_{eff} / ρ – массовый коэффициент поглощения γ -излучения в самом рудном пласте, равный 0,032 (см²/г);

K – постоянный коэффициент для урана, равный $2,9 \cdot 10^3$ (мкр/ч)*(см²/г).

Если радиоактивный пласт содержит не только уран, но и торий и калий-40, то все содержание пересчитывается в эквивалентное содержание урана через урановые эквиваленты.

Если радиоактивный пласт бесконечного простирания перекрыт неактивными наносами мощностью h_n и с поглощающими свойствами μ_n , то интенсивность γ -излучения на поверхности наносов будет определена как:

$$I = I_0 F(\mu h)$$

где I_0 – интенсивность γ -излучения на поверхности радиоактивного пласта бесконечного простирания;

$F(\mu h)$ – функция Кинга, описывающая поглощение от радиоактивного пласта в неактивных наносах..

В таблице 1 приводятся значения функции Кинга для различных μh . Необходимо учитывать, что глубинность гамма-съемки не превышает 0,8 метра. Поэтому, при мощности радиоактивного пласта более 1 метра и размеров пласта по горизонтали более 2 метров, можно предполагать (в центре аномалии), что пласт имеет бесконечное простирание и бесконечную мощность

Табл.1

μh	F	μh	F	μh	F	μh	F
0.00	1.00	0.32	0.45	0.65	0.26	0.97	0.16
0.04	0.87	0.36	0.42	0.68	0.24	1.04	0.14
0.07	0.78	0.40	0.39	0.72	0.23	1.12	0.13
0.11	0.71	0.43	0.37	0.76	0.22	1.19	0.12
0.14	0.66	0.47	0.35	0.79	0.20	1.26	0.11
0.18	0.60	0.50	0.33	0.83	0.19	1.33	0.11
0.22	0.56	0.54	0.31	0.86	0.18		
0.25	0.52	0.58	0.29	0.90	0.17		
0.29	0.48	0.61	0.27	0.94	0.16		

Интерпретация данных радиометрической съемки ведется в следующей последовательности.

Строится график наблюдаемых значений интенсивности гамма-поля по профилю (в мкР/ч). На каждом участке безаномального (нормального) поля вычисляются (минимум по 7 – 10 точкам) среднее арифметическое (I_{cp}) и дисперсия (σ) по данной выборке. На рисунке безаномальным участкам соответствуют участки графика над вмещающими породами, выделенные пунктирными линиями.

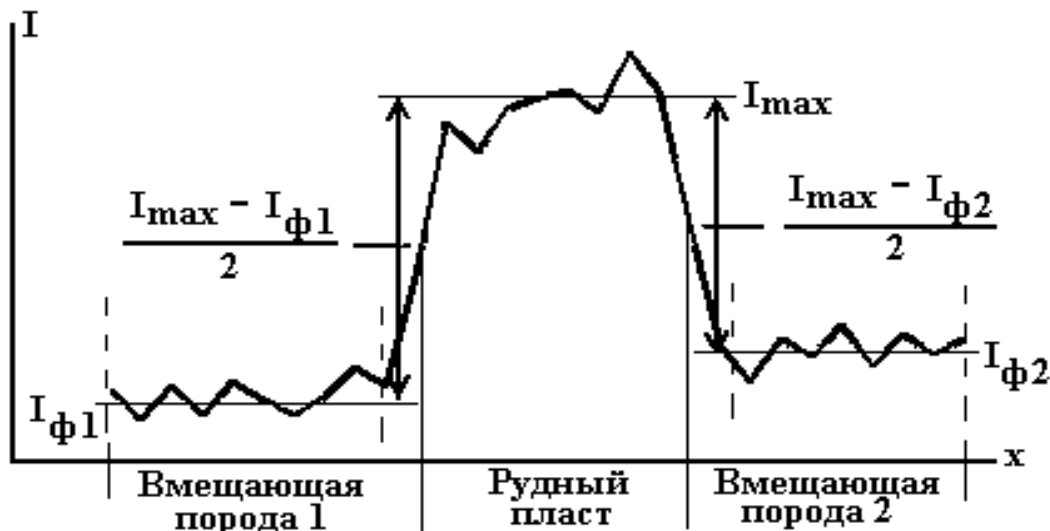


Рис.6. Пример вычисления параметров интерпретации при гамма-съемке

$$I_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n}; \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_{av})^2}{(n-1)}}$$

где n – количество точек в выборке, I_i – интенсивность γ -излучения (мкР/ч) в i -точке. За уровень нормального поля принимается значение I_{av} , которое также называется фоновым значением I_{ϕ} .

На фоне флуктуаций нормального поля проблема выделения аномальных участков решается, как и во всех геофизических методах, так: за нижний предел выделения аномалий принимается уровень, превышающий значение $I_{\phi} + 3\sigma$ («критерий 3σ »).

Границы аномальных зон отбиваются по значениям $(I_{max} - I_{\phi})/2$. Если фоновые значения справа и слева от аномалии различны, то границы аномального тела рассчитываются с каждой стороны отдельно, т.е. отдельно для фона справа, и отдельно для фона слева.

Радиометр СРП-68

Сцинтилляционный геологоразведочный прибор СРП-68-01 предназначен для геологического поиска радиоактивных руд по их гамма-излучению на поверхности и в шпурах глубиной до 1 метра. СРП-68 состоит из пульта и блока детектирования, соединенные кабелем. Блок детектирования снабжен ручкой.

Блок-схема интегрального радиометра

Для обнаружения и измерения интенсивности ядерных излучений применяются приборы, называемые радиометрами. Радиометры подразделяются:

1. Интегральные – измеряют суммарную интенсивность γ -излучения (или потока частиц) вне зависимости от их энергии.
2. Спектрометрические – измеряют распределение γ -квантов (частиц) по энергиям.

Интегральные радиометры. Полевые радиометры состоят из двух блоков: блока детектирования и блока регистратора.

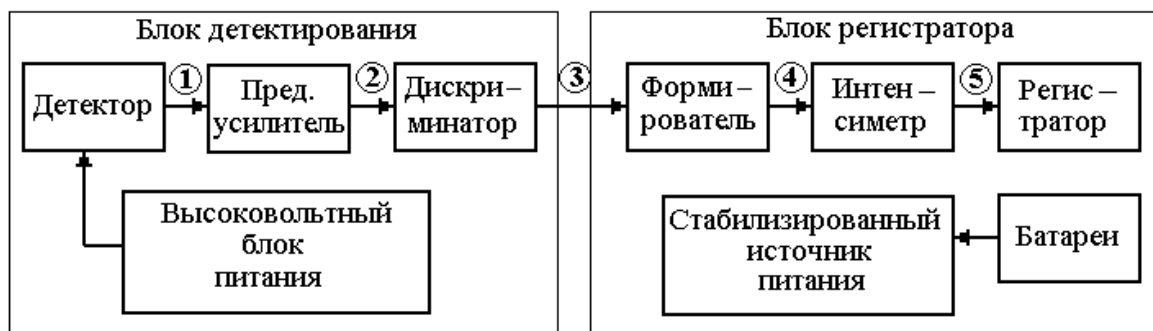


Рис.7. Блок-схема радиометра СРП-68.

Источником питания полевых радиометров являются батареи (аккумуляторы), находящиеся в блоке регистратора. Чтобы предотвратить ухудшение рабочих характеристик прибора из-за разряда батарей, все внутренние блоки питаются от внутреннего стабилизированного источника питания. Например, в полевом радиометре СРП-68, в блоке батарей расположены 9 элементов, которые обеспечивают начальное напряжение 13.5 вольт. На выходе стабилизированного источника питания – напряжение 5 вольт, что позволяет работать радиометру при разряде батарей до 8 вольт.

Важным элементом радиометра, определяющим его характеристики, является детектор. В настоящее время в полевых радиометрах наиболее широко используются сцинтилляционные детекторы, гораздо реже – газонаполненные.

Как для первых, так и для вторых, для обеспечения их работоспособности необходимо на питание детектора подавать высокое напряжение ($300 \div 1000 \text{ В}$). В целях безопасности и надежности, в полевых радиометрах высоковольтный блок питания помещается в непосредственной близости от детектора – в боке детектирования.



Рис.8. Сигналы на выходе различных узлов радиометра

На выходе детектора (рис.8_1) наблюдается распределение импульсов различной амплитуды (γ -кванты различной энергии). Импульсы с детектора поступают на вход предварительного усилителя. Для передачи импульсов без искажений первый каскад предусилителя имеет высокое входное сопротивление и низкое выходное сопротивление. На выходе предусилителя (рис.8_2) – не искаженные импульсы, но уже большей амплитуды, которые поступают на дискриминатор. Назначение

дискриминатора – пропускать импульсы, амплитуда которых выше уровня дискриминации, и подавлять импульсы ниже порога дискриминации (рис.8_3). Уровень дискриминации должен соответствовать импульсам γ -квантов с энергией ≈ 30 Кэв (эффективность сцинтилляционных детекторов для γ -квантов с энергией ниже 30 Кэв практически равна 0). Формирователь предназначен для того, чтобы импульс после дискриминатора, а они разной амплитуды и длительности, преобразовать в импульс стандартной длительности, амплитуды и формы (рис.8_4). Назначение интенсиметра – преобразовать стохастическую (случайную) последовательность импульсов в постоянный ток, сила которого пропорциональна частоте импульсов (т.е. количеству импульсов в единицу времени), поступающих с выхода формирователя (рис8_5).

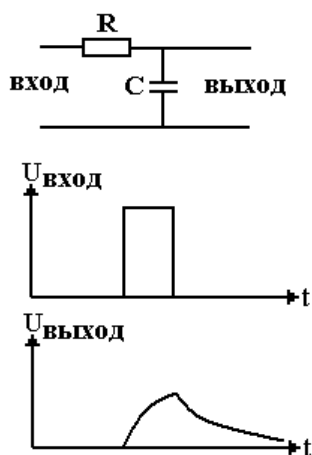


Рис.9. Схема и сигналы интегрирующей ячейки.

В аналоговых приборах в качестве интенсиметра используют устройство, основным элементом которого является интегрирующая ячейка (рис.9). Интегрирующая ячейка состоит из сопротивления R и емкости C . Если в первоначальный момент времени емкость разряжена до нуля, то при поступлении на вход импульса, емкость начинает заряжаться. Как только импульс закончится, то емкость начинает разряжаться. Скорость заряда (разряда) емкости зависит от параметра интегрирующей ячейки

$\tau = RC$ (сек), называемой постоянной времени. Если импульсы поступают редко, то усредненная величина тока (напряжения) на выходе будет мала и наоборот. В качестве регистратора используются стрелочные приборы.

В цифровых приборах интенсиметр реализуется проще: за определенное время считаются импульсы с формирователя за определенное время. Перевод показаний имп/сек в единицы экспозиционной дозы (мкр/час)

производится при помощи радиоактивных эталонов с известной активностью в процессе эталонировки.

Технические характеристики радиометра СРП-68

1. СРП-68 регистрирует гамма-излучение при энергетическом уровне дискриминации 30 ± 5 КэВ.
2. Диапазон измеряемых средних скоростей счета $0 - 10^4$ имп/сек.
3. Весь диапазон разбит на поддиапазоны 100, 300, 1000, 3000 и 10000 имп/сек.
4. Диапазон измерений мощности экспозиционной дозы прибора СРП-68 до 3000 мкр/час. Также разбит на поддиапазоны 30, 100, 300, 1000 и 3000 мкр/час.
5. Постоянная времени интегрирования – 2.5 и 5 сек.
6. Прибор имеет линейную шкалу с отклонениями от линейности не более 5 %.
7. Рабочие условия эксплуатации: температура от -20°C до 50°C , прибор герметичен.
8. Время установления рабочего режима – 1 минута.
9. Основная погрешность прибора не превышает 10 %.
10. Дополнительная погрешность прибора от изменения температуры не превышает 0.08% на один градус.
11. Дополнительная погрешность прибора при изменениях напряжения от 15 до 8 Вольт не превышает 2.5% от среднего значения замеров.

Погрешности при радиометрических измерениях.

Основными источниками погрешностей при радиометрии являются:

1. Нестабильность параметров аппаратуры.
2. Неточность эталонирования.
3. Статистический характер радиоактивного распада и взаимодействия излучений.

Погрешности первых двух типов сходны с погрешностями других измерений. При тщательной работе они могут быть менее 1—2% от измеряемой величины.

Рассмотрим третий тип погрешностей, обусловленных случайными потоками частиц (квантов). Дисперсия σ и относительная погрешность измерений δ интенсивности излучения I за время t определяется формулой:

$$\delta_I = \frac{1}{\sqrt{It}} \quad \sigma_I = \sqrt{\frac{I}{t}}$$

Отсюда видно, что уменьшения относительной погрешности измерений можно добиться увеличением времени измерений t и повышением скорости счета I . Последнее достигается увеличением чувствительности детекторов (их размеров и эффективности), а в методах ядерной геофизики, использующих искусственные источники излучений, также повышением мощности источников (в пределах техники безопасности).

Одной из причин снижения точности измерения, особенно в случае аномалий малой интенсивности, является наличие радиоактивного фона. Фон приборов включает три составляющие: космический фон (КФ), излучение окружающих пород и собственный (остаточный) фон, обусловленный радиоактивным загрязнением материалов счетчика и других частей радиометра.

Сумма космического и остаточного фона составляет натуральный фон (НФ) прибора. Остаточный фон сцинтилляционных счетчиков не превышает 1 мкР/ч, натуральный фон - 2 мкР/ч. Для определения НФ можно применять также многократные измерения с экранами и без них. Когда величина натурального фона не определена, за его значение принимают показания на участках со слабо активными породами (чистые известняки, каменная соль и т. д.).

Вычислим погрешность определения интенсивности излучения при наличии фонового излучения I_ϕ . Через I' обозначим интенсивность излучения от аномалии, включая фон, через t и t_ϕ – соответственно время измерений аномалии и фоновое измерение. Истинная интенсивность излучения аномалии (без фона) определяется по формуле: $I = I' - I_\phi$. Относительная погрешность измерений δ_I интенсивности в данном случае будет:

$$\delta_I = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{I + I_\phi}{t} + \frac{I_\phi}{t_\phi}}$$

Отсюда видно, что увеличение фона существенно снижает точность измерений, если величины I и I_ϕ соизмеримы.

Наличие фона ограничивает и так называемый порог чувствительности — минимальную интенсивность излучения, надежно измеряемую радиометром. За порог чувствительности радиометров обычно принимают трехкратное значение среднеквадратического отклонения фона, что для различных радиометров составляет от 0,5 до 2 мкР/ч.

Измерения с радиометром СРП-68

Перед началом работ с прибором необходимо:

1. Ознакомиться с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации.
2. Поставить переключатель режима работ в положение «Выкл».
3. Проверить, находится ли стрелка прибора на нуле. Если не находится, то установить ее на нулевую отметку ретиром (винт, находится под стрелкой прибора).
4. Отвинтить винты, открыть крышку батарейного отсека и вставить комплект батарей (9 штук), строго соблюдая полярность.

В верхней части панели пульта расположен переключатель диапазонов измерений, имеющий две оцифровки пределов измерений: сверху — исполненная черной печатью для измерения в имп/сек; снизу — красной — для измерения в мкР/час.

Слева внизу панели пульта расположен переключатель режима работы:

1. В положении «Выкл» прибор выключен.
2. В положении «Бат» стрелочный прибор измеряет напряжение батареи питания (отсчет по верхней шкале, имеющей конечное значение 15 В).
3. В положениях «2.5» и «5» переключателя прибор включен для измерений мощности экспозиционной дозы гамма-излучения с постоянной времени измерения соответственно 2.5 и 5 секунд.
4. В последнем положении «5 В» стрелочный индикатор прибора контролирует напряжение на выходе стабилизированного источника питания (отсчет по верхней шкале, имеющей конечное значение 10 В).

Слева от переключателя режима работ расположена кнопка «Контроль», с помощью которой контролируется плато счетной характеристики ФЭУ изменением усиления сигнала с ФЭУ на 20 – 30%.

Подготовка к измерениям:

1. Исходное положение органов управления: 3000 мкР/час и «Выкл».
2. Включить прибор, переведя переключатель режима в

положение «Бат». Напряжение батарей должно быть в пределах 8 – 15 вольт.

3. Перевести переключатель режима в положение «5 В». Напряжение на выходе стабилизатора должно быть 5 ± 0.5 В.

4. Все измерения могут быть начаты спустя 1 минуту после включения прибора.

При измерении переключатель диапазонов выбирается так, чтобы показания прибора не были меньше 30% и не более 70% от шкалы прибора (на краях шкалы возрастает нелинейность).

В зависимости от измеряемой мощности экспозиционной дозы устанавливается постоянная времени 2.5 или 5 секунд. Выбор постоянной времени и времени измерения определяется:

- при постоянной времени измерения 5 секунд влияние статистических флуктуаций на измеряемое значение уменьшается, но возрастает время отсчета;

- при рядовой съемки (относительная погрешность измерения около 10%) время отсчета превышает постоянную времени примерно в три раза, т.е. при постоянной 2.5 сек время отсчета 8 секунд, а при постоянной времени 5 секунд время отсчета – 15 секунд;

- погрешность измерения существенно уменьшается при вычислении отсчета как среднеарифметического из показаний за 30 – 50 секунд наблюдения при постоянной времени 5 секунд;

- как правило, при измерениях значений близких к фоновому, выбирают постоянную времени 5 секунд, а время измерения на каждой точке 30 – 40 секунд; при измерениях значений в разы превышающих фоновые, время измерения можно уменьшить до 10 – 15 секунд.

Задания.

Радиометр СРП-68

1. Изучить блок-схему интегрального радиометра, технические характеристики радиометра, определение погрешности при радиометрических измерениях и как проводить измерения с радиометром СРП-68.

2. Ответить на контрольные вопросы.

3. Провести следующие измерения:

- На одной и той же точке наблюдения провести 15 измерений с постоянной времени 2.5 секунды, длительность измерения 8 секунд. Данные измерений оформить в виде таблицы.

▪ На той же точке повторить те же измерения, но с постоянной времени 5 секунд и временем измерения 30 секунд. Данные измерений оформить в виде таблицы.

▪ Рассчитать относительную погрешность измерения в обеих сериях измерений, определить порог обнаружения в каждом случае.

Интерпретации данных гамма - съемки

Над урановым месторождением проведена радиометрическая пешеходная поисковая гамма-съемка масштаба 1 : 5000 с шагом наблюдений через 10 метров. Данные по одному из профилей измерений приведены в таблице 2. Участок съемки перекрыт рыхлыми неактивными отложениями мощностью 0,2 метра с плотностью 1,8 г/см³. По данным геологической съемки на данном участке ураносодержащие породы представляют собой линзы мощностью более 2 метров и диаметром более 5 м, плотность пород линз 2,3 г/см³, $\mu_{эфф} = 0,08 \text{ см}^{-1}$.

Выделить границы рудных зон и оценить содержание равновесного урана в выделенных аномальных участках.

Табл.2

№ пк	I (мкР/ч)		№ пк	I (мкР/ч)		№ пк	I (мкР/ч)		№ ПК	I (мкР/ч)
1	10		16	25		31	15		46	26
2	9		17	21		32	13		47	23
3	8		18	24		33	12		48	18
4	9		19	18		34	13		49	14
5	8		20	14		35	15		50	11
6	9		21	14		36	13		51	9
7	8		22	14		37	16		52	11
8	10		23	13		38	15		53	10
9	8		24	14		39	20		54	10
10	11		25	13		40	23		55	9
11	11		26	13		41	30		56	9
12	14		27	16		42	31		57	9
13	15		28	17		43	28		58	9
14	19		29	15		44	30		59	10
15	23		30	17		45	28		60	10

Необходимо:

1. Построить график $I = f(x)$. На участках нормального поля (без аномалий) рассчитать фоновые значения и дисперсию. Определить уровень выделения аномалий.

2. Определить границы аномалий.
3. На каждой выделенной аномалии определить среднее значение аномальной интенсивности.
4. для среднего значения каждой аномалии учесть поглощение гамма-излучения в наносах, т.е. убрать влияние наносов на измерения.
5. Предполагая, что аномалии представляют собой вертикальный шток бесконечного простираения, рассчитать содержание урана в каждой аномалии.

Контрольные вопросы

1. Какими способами можно оценить ослабление γ - излучения в веществе?
2. Что такое урановый эквивалент, где он применяется?
3. Для чего используется функция Кинга?
4. Назначение узлов радиометра СРП-68 (блок-схема).
5. Что такое постоянная времени измерения радиометра?
6. Основные погрешности измерения радиометром, чем они определяются?
7. Порог чувствительности радиометра?
8. Почему относительная погрешность измерения радиометром при постоянной времени 2.5 выше, чем при измерении с постоянной времени 5 секунд?

Литература

1. Ларионов В.В., Резванов Р.А. Ядерная геофизика и радиометрическая разведка / Учебник для ВУЗов – 3-е изд. - М.: Недра, 1988 – 325 с.
2. Разведочная ядерная геофизика. Справочник геофизика. М., Недра, 1977, 296 с.

Работа 4. Изучение гамма-спектрометра ГАММА-1С, лабораторное определение содержания естественных радиоактивных элементов в пробах

Естественная радиоактивность горных пород

В настоящее время известно более 50 естественных радиоактивных элементов. К ним относятся тяжелые элементы, входящие в состав радиоактивных семейств, и более легкие радиоактивные элементы, распад которых ограничивается одним звеном превращений.

В число радиоактивных семейств входят элементы семейств урана U^{238} , актиноурана U^{235} и тория Th^{232} . Представители ряда актиноурана U^{235} в природе встречаются в малых количествах.

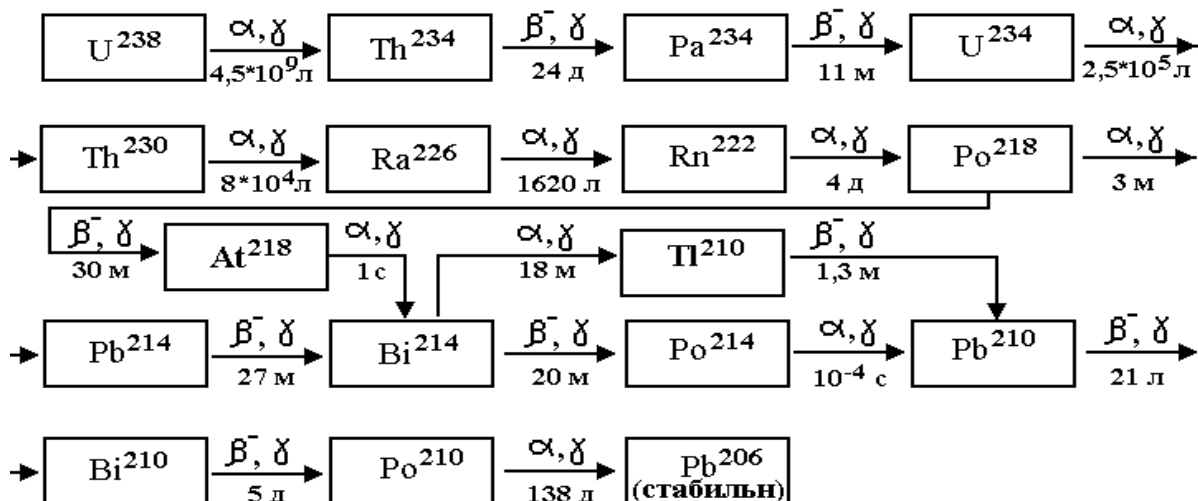


Рис.10. Схема радиоактивных превращений семейства урана

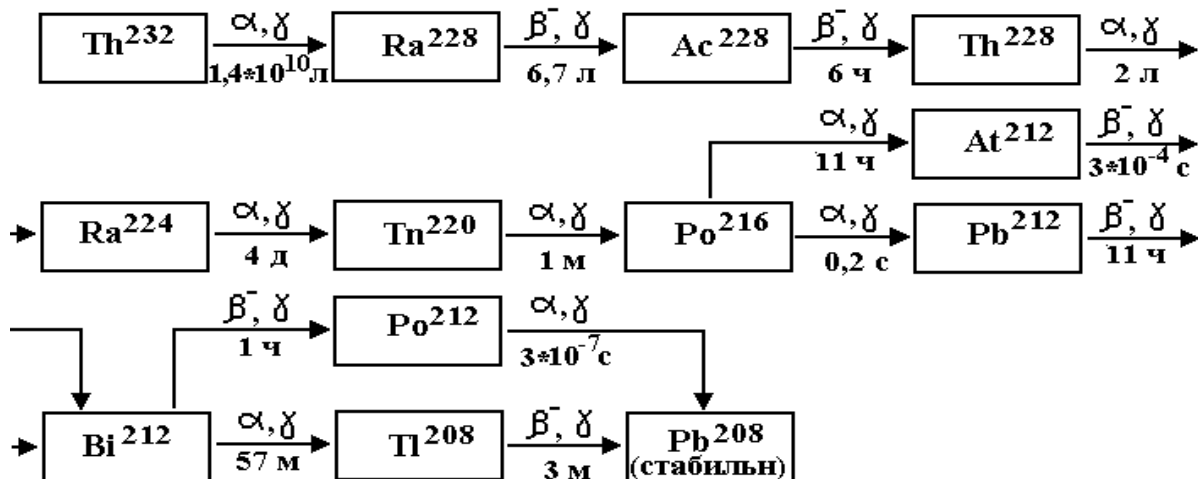


Рис.11. Схема радиоактивных превращений семейства тория

На рис. 10 - 11 стрелками указана последовательность распада. Над стрелками приведены типы излучений, сопровождающие распад, под стрелками – периоды полураспада в следующих единицах: л – годы (лет), д – дни, ч – часы, м – минуты, с – секунды.

Родоначалники семейств характеризуются самыми большими массовыми числами и относятся к наиболее долгоживущим. Во всех случаях в результате распада образуются все более легкие элементы. В первой половине цепи превращений каждого семейства распад сопровождается преимущественно испусканием α -частиц, во второй половине преобладает β -распад. В середине цепи превращений каждого семейства имеются радиоактивные газы — эманации (в ряду урана это радон Rn^{220} , в ряду тория – торон Tn^{220}), относящиеся к группе инертных. За эманациями следуют группы короткоживущих элементов, часть атомов которых распадается с испусканием α -частиц, а другая часть - β -частиц. Эти элементы образуют разветвления рядов - «вилки». Необходимо отметить, что α - и β -распады сопровождаются испусканием γ -квантов различных энергий. Конечным продуктом распада этих двух семейств являются стабильные изотопы свинца Pb^{206} и Pb^{208} .

Табл.3.

Основные γ -излучатели в ряде урана							
Изотоп	Pb^{214}	Pb^{214}	Bi^{214}	Bi^{214}	Bi^{214}	Bi^{214}	
Е (МэВ)	0.295	0.352	0.609	1.112	1.764	2.204	
% выхода	10.0	19.4	22.3	7.8	8.4	2.6	
Основные γ -излучатели в ряде тория							
Изотоп	Pb^{212}	Ac^{228}	Tl^{208}	Tl^{208}	Ac^{228}	Ac^{228}	Tl^{208}
Е (МэВ)	0.239	0.338	0.511	0.583	0.911	0.967	2.615
% выхода	22.5	6.2	4.5	15.0	14.5	11.5	17.9

По суммарной α -активности семейства урана и тория примерно одинаковы, энергетические спектры α -частиц, испускаемых каждым семейством в целом, друг от друга существенно не отличаются, энергия α -частиц находится в интервале $2 \div 8$ МэВ. По суммарной интенсивности β -излучения семейства урана и тория существенно не различаются.

Основными γ -излучателями в семействе урана являются продукты распада радия (Ra^{226}) и радона (Rn^{222}). Важной особенностью этого семейства является то, что на долю продуктов распада урана, расположенных в цепи превращения до радия, приходится всего лишь около 2% от общего γ -излучения ряда. Вследствие этого при нарушении в горных породах радиоактивного равновесия между ураном и радием, приводящего к недостатку радия, γ -активность горных пород резко снижается, и, наоборот, породы, обогащенные солями радия или радоном, даже при отсутствии в них урана являются γ -активными. В семействе тория основные γ -излучатели распределены относительно равномерно. В таблице 3 приведены сведения об основных γ -излучателях в рядах урана и тория.

Строка «% выхода» в таблице 3 показывает процент γ -квантов данной энергии от суммарного количества γ -квантов, испускаемых всеми изотопами данного ряда в единицу времени. Необходимо отметить, что в обоих рядах излучается примерно по 50 γ -квантов различных энергий, значительная часть которых обладает энергией меньшей 250 Кэв. Максимальной энергией γ -квантов в ряде урана обладает Bi^{214} (2.204 Мэв), в ряде тория – Th^{208} (2.615).

К числу радиоактивных элементов, не входящих в состав рассмотренных семейств, относятся изотопы калия (K^{40}), рубидия (Rb^{87}), индия (In^{115}), самария (Sm^{147}), лютеция (Lu^{176}), рения (Re^{187}) и др. Основные характеристики некоторых из этих изотопов приведены в таблице 4.

Все одиночные радиоактивные изотопы характеризуются весьма большими периодами полураспада ($T > 10^9$ лет). За исключением самария и вольфрама они распадаются путем К-захвата и β -распада, превращаясь в устойчивый изотоп нового элемента. Содержание в природе большинства из перечисленных радиоактивных изотопов, как правило, очень мало. В ядерной геологии и геофизике наибольший интерес представляют радиоактивные изотопы калия (K^{40}) и рубидия (Rb^{87}), распад которых используется для определения возраста пород.

Наибольший интерес представляет изотоп K^{40} , т.к. распространенность элемента Ca^{40} в природе огромно – этот элемент входит в состав породообразующих минералов (например кальцит, известняк, доломит и др.). Другие радиоактивные элементы, не входящие в ряды, за исключением вольфрама, относятся к группе редкоземельных, и их вклад в естественную радиоактивность пород ничтожен. В ядерной

геофизике эти элементы используются при определении абсолютного возраста пород.

Табл.4.

Радиоактивные элементы, не входящие в ряды				
Изотоп	Продукт превращения	Содержание изотопа, %	T, годы	Тип распада
K40	Ca40	0.0119	$1.3 \cdot 10^9$	К-захват, β^-
Rb87	Sr87	27.8	$5 \cdot 10^{10}$	β^-
In115	Sn115	95.8	$6 \cdot 10^{14}$	β^-
Te130	I130	34.1	$1.4 \cdot 10^{21}$	β^-
La138	Ba138	0.089	$7 \cdot 10^{10}$	К-захват
Sm147	Nd143	15.1	$6.7 \cdot 10^{11}$	α
Lu176	Hf176	2.6	$2.4 \cdot 10^{10}$	β^-
W180	Hf176	0.126	$2.2 \cdot 10^{17}$	α
Re187	Os187	62.9	$4 \cdot 10^{12}$	β^-

Сцинтилляционные детекторы, особенности использования сцинтилляционных детекторов при гамма-спектрометрии

Основными характеристиками спектрометрических детекторов являются: эффективность регистрации и энергетическое разрешение.

Энергетическое разрешение спектрометрического детектора. Под энергетическим разрешением детектора понимают способность детектора разделять регистрировать близкие по энергетическому спектру линии. Разрешение детектора определяют по аппаратному спектру на выходе детектору. Численно энергетическое разрешение, выраженное в процентах, характеризуют отношением ширины пика от моноэнергетического источника на половине высоты к энергии источника.

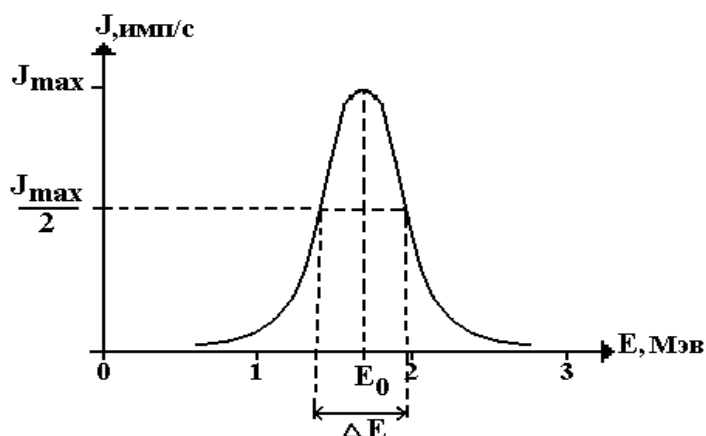


Рис.12. Расчет энергетического разрешения детектора;

$$A = (\Delta E/E_0) \cdot 100\%$$

Энергетическое разрешение детектора, в паспортных данных, приводится для энергии γ -квантов $E_0 = 1$ МэВ. Энергетическое разрешение уменьшается с ростом энергии излучения как $(E)^{-0.5}$. В сцинтилляционном детекторе оно составляет 8 – 12% при энергии γ -излучения 1 МэВ. Кроме процессов, происходящих в самом сцинтилляционном детекторе, искажение реальных спектров γ -излучения, обусловлено также наличием аппаратного разрешения – уширения пиков за счет процессов в электронных схемах прибора. В результате аппаратное разрешение спектрометра с сцинтилляционным детектором составляет 8 – 14 % при энергии γ -излучения 1 МэВ. Следствием аппаратного разрешения спектрометра является то, что пики, близко расположенных по энергии, не всегда разрешаются.

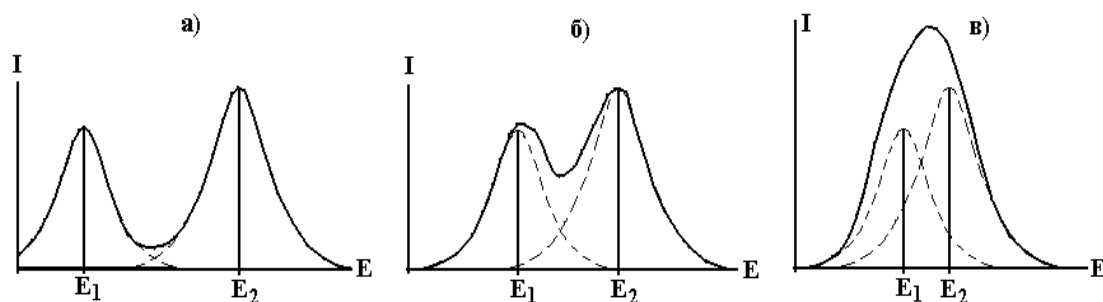


Рис.13. Примеры различного разрешения двух, близких по энергии пиков:

а) полное разрешение; б) частичное разрешение; в) пики не разрешаются (не разделяются). E_1 и E_2 – энергии гамма-квантов. Штриховая линия – индивидуальные спектры гамма-квантов, сплошная кривая – суммарный спектр, зарегистрированный детектором.

Эффективность регистрации - это отношение количества зарегистрированных сигналов к количеству частиц (γ -квантов), падающих на детектор $\varepsilon = (N_{\text{рег}}/N_{\text{сум}}) * 100\%$.

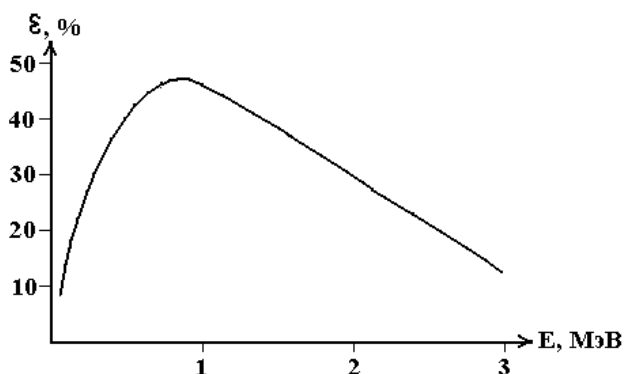


Рис.14. Зависимость эффективности регистрации гамма-квантов сцинтилляционным детектором.

Эффективность регистрации сцинтилляционного детектора зависит от энергии гамма-квантов.

При малых энергиях гамма-квантов, примерно до 30 КэВ, $\varepsilon = 0\%$. С увеличением роста энергии гамма-квантов, эффективность их регистрации детектором растет, достигая максимума в районе 0.5 – 0.7 МэВ. Далее с увеличением энергии эффективность падает.

Это приводит к искажению интенсивности пиков спектра гамма-квантов для веществ, испускающих гамма-кванты различных энергий.

Искажение спектра вследствие различной эффективности регистрации на разных энергиях, демонстрируется на рис.15. Из таблицы 3 следует, что интенсивность пиков гамма-квантов с энергиями 2.615 МэВ, 0.911 МэВ и 0.583 МэВ примерно одинакова, но из-за уменьшения эффективности регистрации с увеличением энергии, интенсивность пика 2.615 МэВ значительно меньше.

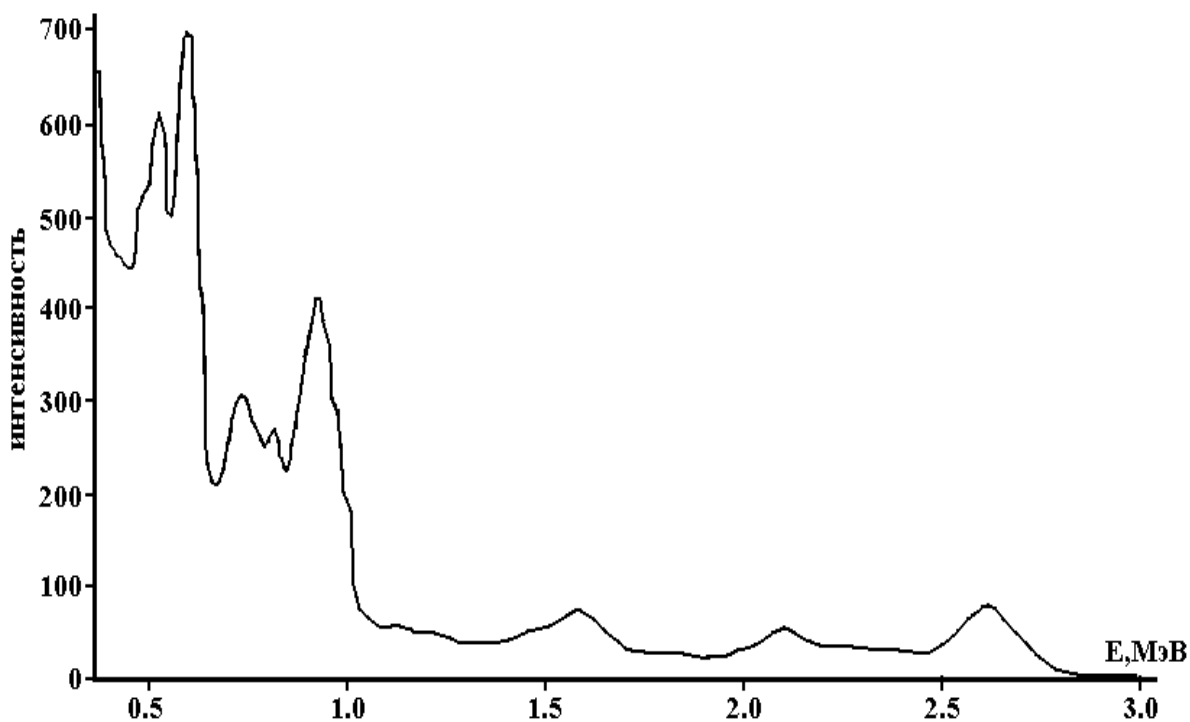


Рис.15. Спектр тория, снятого сцинтилляционным детектором

Основы количественного определения содержания естественных радиоактивных элементов горных пород

Гамма - спектрометрический метод основан на том, что интенсивность излучения радиоактивного элемента прямо пропорционально его содержанию в объекте. Гамма-кванты, испускаемые атомными ядрами, обладают дискретным линейчатым спектром, у каждого изотопа свой спектр γ - излучения. Сведения о наиболее интенсивных гамма - излучателях рядов урана и тория приведены в табл.3.

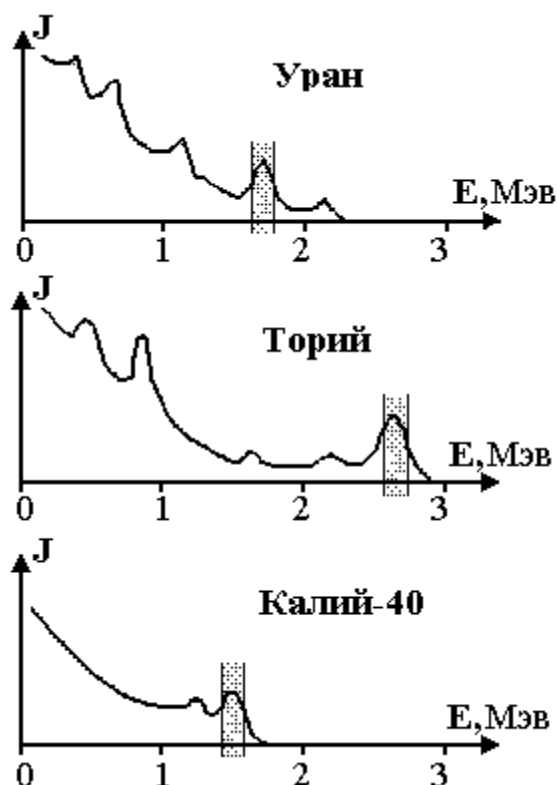


Рис.16. Энергетические уровни определения урана (радия), тория и калия-40 в спектрометре СП-4.

Обычно в полевых и скажинных гамма – спектрометрах число каналов регистрации ограничено – обычно 3 канала. Для определения содержания естественных радиоактивных элементов, в 3-х канальных спектрометрах начала 80-х годов (СП-4, РКП-305 и др.) в спектре урана выделялся энергетический интервал 1,65 – 1,85 МэВ, связанный с излучением Bi^{214} (1,76 МэВ), в спектре тория – интервал 2,5 – 2,7 МэВ (излучение Tl^{208} 2,615 МэВ), γ -излучение K^{40} содержит пик 1,46 МэВ, - интервал измерений 1,30 – 1,55 МэВ. Выбор интервалов измерений осуществлялся по критериям: пики γ -излучения должны быть достаточно интенсивными; выбранные интервалы энергий для различных элементов должны хорошо разрешаться сцинтилляционным детектором.

Как видно из рисунка 16, в интервалах измерения данного элемента, присутствует излучение в виде фона от другого элемента. Например, в канале урана (1,65 – 1,85 Мэв) присутствует фон от тория. Точный аналитический учет «фона» от других элементов практически невозможен. Эту проблему решают следующим образом.

При измерении породы, содержащей все три компоненты естественной радиоактивности, измерения в каждом канале можно представить так:

$$J_U = a_1 C_K + b_1 C_U + c_1 C_{Th}$$

$$J_{Th} = a_2 C_K + b_2 C_U + c_2 C_{Th}$$

$$J_K = a_3 C_K + b_3 C_U + c_3 C_{Th}$$

где: J_U , J_{Th} , J_K – измеренная интенсивность в каналах урана, тория и калия; C_K , C_U , C_{Th} – содержания калия, урана и тория в измеряемой породе; a_i , b_i , c_i – коэффициенты, учитывающие взаимовлияние каналов («фона»). Девять коэффициентов (a_i , b_i , c_i) находят при измерении трех эталонов с известным содержанием радиоактивных элементов, причем содержания в эталонах должно различным. При таком способе измерений относительная погрешность определения составляла примерно 5 – 8%, а порог чувствительности оценивался для урана и тория $(1,5 \div 3) \cdot 10^{-4}\%$ равновесного урана, для калия – $(1,5 \div 3) \cdot 10^{-1}\%$.

При измерении в скважинах, где реализуется геометрия измерений 4π , или на поверхности (геометрия 2π), представительность измерения достаточно высока. Следствием высокой представительности опробования является довольно низкая относительная погрешность определения содержания радиоактивных элементов – примерно 5 – 10%.

(Примечание.

Представительность опробования – оценка достоверности опробования. Зависит от однородности содержания определяемого параметра в пробе, следовательно, зависит от веса (объема) пробы – чем больше вес пробы, тем выше достоверность. Также, при увеличении веса пробы, растет измеряемый сигнал, что повышает соотношение сигнал/шум - понижается нижний порог определения содержания.

Глубинность исследования гамма-методами определяется проникающей способностью гамма-излучения в породах. В осадочных породах глубинность исследования составляет 0.5 метра. Геометрия 4π – сфера радиусом 0.5 м, в центре которой располагается детектор. Т.е.

объем исследуемой пробы в этом случае примерно 0.5 м^3 . Геометрия 2π – полусфера.).

Таким образом, при полевых и скважинных определениях содержания естественных радиоактивных элементов, за счет высокой представительности опробования, вполне надежные результаты получаются с 3-х канальным гамма - спектрометром.

Совершенно другая ситуация получается при лабораторных измерениях. Объем пробы не превышает 0.001 м^3 (1 литр) – например, кусок керна. Измеряемый сигнал очень мал – на уровне шумов. Если использовать 3-х канальный анализатор, то относительная погрешность измерений при малых содержаниях превысит 100%. Выходом из этой ситуации является определение содержания урана и тория не по одному пику спектра (как в 3-х канальном спектрометре), а по 5 – 6 пикам для каждого ряда. Интенсивности и энергии гамма - излучения каждого члена ряда урана и тория известны (см. табл.3). Чтобы использовать эту методику необходимо решить следующие задачи:

1. Регистрировать спектр гамма-излучения от первых сотен КэВ до 3 МэВ.
2. Учесть зависимость эффективности регистрации гамма – излучения сцинтилляционным детектором от энергии гамма – излучения, чтобы ввести поправку в интенсивности зарегистрированных пиков.

В современных моделях гамма - спектрометров число каналов не менее 1024, что позволяет снимать практически весь спектр гамма – излучения естественных радиоактивных элементов. Зависимости эффективности регистрации от энергии гамма-излучения можно учесть, зарегистрировав спектр эталона, содержащего либо равновесный уран (ряд урана), либо спектр изотопов ряда тория. Получают экспериментальную зависимость подобную той, что представлена на рис.5 и вычисляются поправки для интенсивности каждого зарегистрированного пика при различных энергиях гамма-квантов.

Устройство гамма-спектрометра ГАММА-1С

Функционально в состав спектрометра входят следующие основные устройства: свинцовый экран-защита; сцинтилляционный блок детектирования БДС-Г; амплитудно-цифровой преобразователь АЦП-1К (далее по тексту-"АЦП"); компьютер типа IBM PC; принтер; программное обеспечение (ПО).

В основу работы спектрометра положен принцип преобразования энергии гамма-квантов в чувствительном объеме сцинтилляционного детектора

В электрические импульсы пропорциональной амплитуды с последующей их

регистрацией и анализом многоканальным амплитудным анализатором.

Компьютер вместе со встроенной платой АЦП и программным обеспечением представляет собой многоканальный амплитудный анализатор импульсов (АИ).

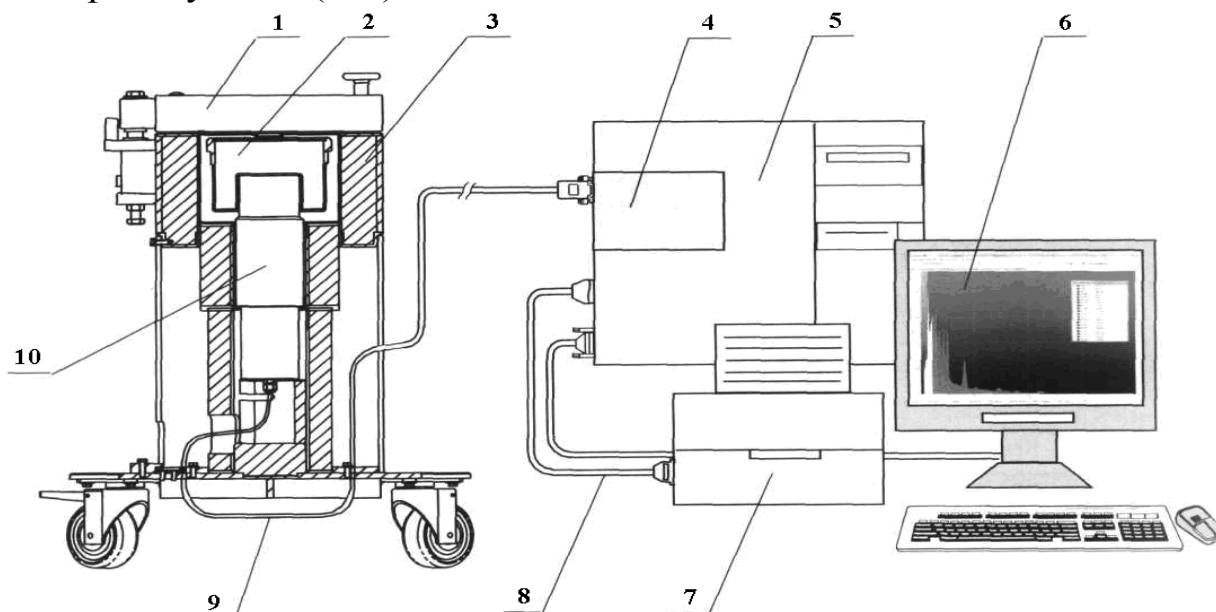


Рис.17. Общий вид спектрометра. 1 - крышка экрана-защиты; 2 - сосуд Маринелли; 3 - экран-защита; 4 - плата АЦП; 5 - процессорный блок; 6 - монитор; 7 – принтер; 8 - кабель интерфейсный; 9 - кабель БДС-Г; 10 - БДС-Г.

Блок БДС-Г с целью уменьшения влияния внешнего гамма-фона и повышения точности измерения активности размещается внутри свинцового экрана-защиты. Исследуемый образец (проба) помещается в измерительный сосуд (сосуд "Маринелли"- 1 л, сосуд "Дента" - 0,1 л или соответствующую геометрию, по которой проведена калибровка по эффективности). Измерительный сосуд с исследуемым образцом устанавливается внутри экрана-защиты на блок БДС-Г. **ВНИМАНИЕ! ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЯ КРЫШКИ ЭКРАНА-ЗАЩИТЫ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ПЛОТНО ЗАКРЫТЫ.**

При облучении сцинтилляционного блока детектирования гамма-квантами в кристалле сцинтиллятора возникают световые вспышки (сцинтилляции), интенсивность которых пропорциональна энергии гамма-

излучения, поглощенной в кристалле. Фотоэлектронный умножитель регистрирует вспышки и преобразует их в импульсы тока. Амплитуда импульса тока пропорциональна интенсивности световой вспышки, а, следовательно, и энергии гамма-излучения, поглощенной в кристалле.

Последующие электронные схемы преобразуют импульс тока в импульс напряжения с параметрами, допускающими непосредственную его подачу на вход аналого-цифрового преобразователя многоканального амплитудного анализатора импульсов.

Для устранения нестабильности фотоприемника в блоке БДС-Г применена специальная система стабилизации, охватывающая весь измерительный тракт. Эталонным репером системы стабилизации является импульс света специального карбид-кремниевого светодиода. Параметры импульса светодиода остаются неизменными при воздействии таких дестабилизирующих факторов, как время и температура.

Сформированный импульс напряжения поступает на вход АЦП, предназначенный для преобразования амплитуды входного импульса в цифровой код, являющийся двоичным номером канала анализатора, и накопления получаемой информации в буферном запоминающем устройстве.

События, представленные в цифровой форме, соответствующие входным импульсам, накапливаются в буферной памяти, образуя спектр амплитуд импульсов. Полученный спектр выводится на экран монитора и может быть сохранен в цифровой форме на жестком и (или) гибком дисках.

Программное обеспечение (ПО) позволяет организовать управление процессами накопления, отображения, обработки информации и вывода результатов обработки на внешние устройства компьютера.

Технические характеристики

Относительное энергетическое разрешение спектрометра по линии гамма-излучения с энергией 662 кэВ (^{137}Cs), %, не более 8

Минимальная измеряемая активность (МИА) для геометрии - сосуд «Маринелли» - 1 л, наполненный дистиллированной водой, за время измерения 2ч, для изотопа:

^{137}Cs , Бк/кг	1,5
^{40}K , Бк/кг	25
^{226}Ra , Бк/кг	3
^{232}Th , Бк/кг	3

Диапазон регистрируемых энергий, кэВ от 50 до 3000

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений характеристики преобразования спектрометра (интегральная нелинейность) в диапазоне измеряемых энергий, %	±1
Диапазон измеряемых спектрометром активностей, Бк/кг:	
¹³⁷ Cs	от 1,5 до 10 ⁵
⁴⁰ K	от 25 до 10 ⁵
²²⁶ Ra	от 3 до 10 ⁵
²³² Th	от 3 до 10 ⁵
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений активности %	от ±10 до ±50
Максимальная входная нагрузка, имп/с, не менее.....	50000
Время установления рабочего режима, мин	45
Время непрерывной работы, ч, не менее	24
Временная нестабильность спектрометра за время непрерывной работы, %, не более	±1
Эффективность регистрации в пике полного поглощения ¹³⁷ Cs на расстоянии 25 см от поверхности крышки детектора, %, не менее	±0,1
Число каналов спектрометра	1024
Масса составных частей спектрометра, кг, не более	
экран-защита	231
блок БДС-Г	2,3
компьютер с платой АЦП-1К и принтером	30
блок БДС-Г	1,5

Кроме того, спектрометр имеет следующие функциональные возможности:

встроенную систему стабилизации усиления по реперному пику светодиода;

измерение спектров с экспозициями по "живому" и реальному времени;

калибровки по энергии, по форме пика и по эффективности;

автоматический режим накопления и обработки спектров, включая идентификацию радионуклидов, и сохранение спектров и результатов их обработки на гибком и жестком дисках;

визуализацию спектров и результатов обработки на экране монитора;

возможность вывода результатов обработки и спектра в графическом виде на принтер;

возможность совмещения процесса накопления спектра и использования компьютера для других целей.

Порядок работы с гамма-спектрометром ГАММА-1С

Подключить вилку сетевого питания процессорного блока и принтера к сети переменного напряжения -220 В, 50 Гц. Переключатели СЕТЬ (POWER) на процессорном блоке и принтере должны быть при этом установлены в положение ОТКЛ (OFF или О).

ВНИМАНИЕ! РОЗЕТКИ СЕТИ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ТРЕХПРОВОДНЫМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМИ ПОДКЛЮЧЕНИЕ К СПЕКТРОМЕТРУ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОДНОВРЕМЕННО С ПОДАЧЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ -220 В.

Примечание - В ряде моделей компьютеров переключатель СЕТЬ установлен и в мониторе, и в процессорном блоке.

Установить переключатели СЕТЬ (POWER) в компьютере и принтере (если он нужен) в положение ВКЛ (ON или 1). При этом должна загореться индикация СЕТЬ (POWER) на компьютере и принтере. На экране монитора должны появиться сообщения о ходе начальной загрузки компьютера. После загрузки операционной системы должна быть автоматически выполнена загрузка драйвера связи платы АЦП с ПО.

Произвести запуск рабочей программы спектрометра.

Спектрометр готов к проведению измерений через 45 мин, после установления рабочего режима.

Калибровка

Работа оператора со спектрометром осуществляется в диалоговом режиме путем выбора из представленного на экране монитора "меню", необходимого режима работы и задания запрашиваемых программой параметров пробы и условий измерения.

Перед проведением измерения содержания гамма-излучающих радионуклидов в пробах необходимо, чтобы спектрометр был откалиброван по форме пика, по энергии и по эффективности.

Калибровку по энергии следует выполнять регулярно, не реже одного раза в день.

Калибровка по форме пика и эффективности выполняется при выпуске спектрометра и поверяется один раз в год при периодической поверке спектрометра.

Примечание - Порядок работы при выполнении всех требуемых калибровок и измерений представлен в прилагаемом описании «Программное обеспечение гамма-спектрометра. Руководство пользователя».

После успешного завершения калибровки спектрометр готов к измерению проб.

Работа в режиме измерения

Установить измерительный сосуд, содержащий подготовленную пробу, в экран-защиту и плотно закрыть крышки.

Выбрать с помощью клавиатуры компьютера режим измерения и, задав время измерения, запустить набор. При задании времени измерения необходимо учитывать, что точность измерения пропорциональна времени набора спектра. При измерении проб с активностью на уровне минимально измеряемой активности, время измерения должно быть не менее 2 ч.

Программное обеспечение ГАММА-1С

Запуск программы

Для запуска программы LSRMLite проделайте следующие операции:

1. На панели задач Windows98 или Windows Millenium Edition щелкните по кнопке Пуск, в появившемся меню выберите Программы и затем выберите программу Lsrmlite.

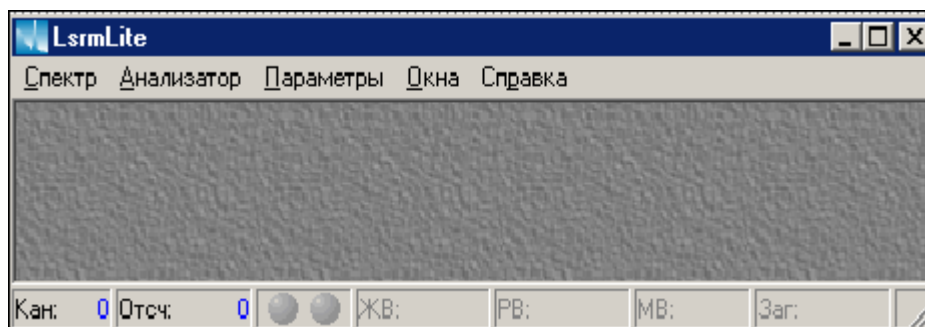


Рисунок 18. Главное окно программы LSRMLite в ждущем режиме

2. Выберите значок LSRMLite на Рабочем столе. Windows98 или Windows Millenium Edition и запустите программу.

После открытия программа Lsrmlite находится в ждущем режиме.

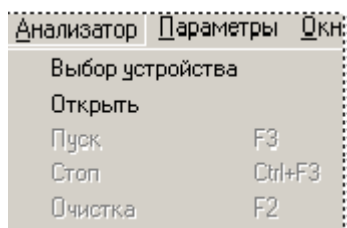


Рисунок 19. Меню «Анализатор»

Для открытия Рабочего окна набора и просмотра спектров найдите в Главном меню подменю "Анализатор" и нажмите на команду "Открыть" (Рис.18). Через несколько секунд после этого действия на экране компьютера откроется Рабочее окно анализатора (Рис.20). Так как это окно применяется не только для набора спектров, но и для просмотра

ранее набранных спектров, то в дальнейшем оно будет обозначаться в тексте, как «Рабочее окно набора и просмотра спектра».

Внизу Рабочего окна расположено два цветных индикатора (кружочки). В зависимости от состояния анализатора индикаторы изменяют свой цвет: при отключенном анализаторе левый индикатор окрашивается в красный цвет, при включенном анализаторе правый индикатор зеленого цвета.

На рис.20 индикатор состояния окрашен в красный цвет, что означает «Анализатор в режиме ожидания». Подробнее о работе с анализатором смотрите ниже.

Назначение Главного окна программы

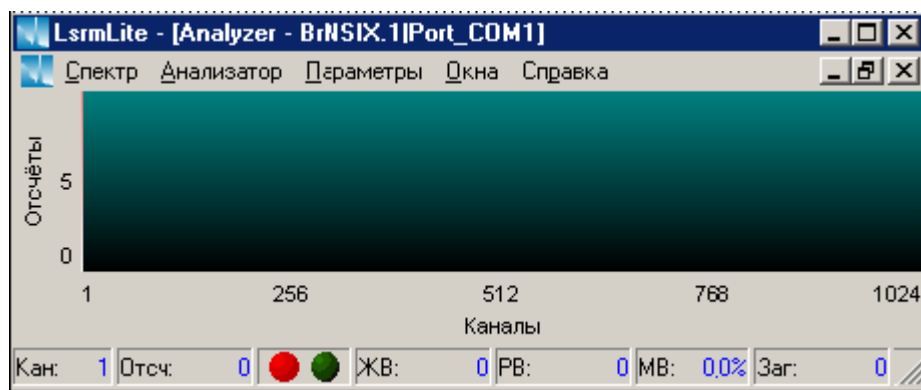


Рис.20. Главное окно программы. Анализатор в режиме ожидания

Главное окно программы LSRMLite состоит из Главного меню, строки состояния Анализатора и Рабочего окна набора спектра.

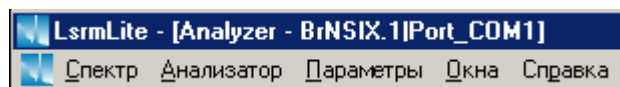


Рисунок 21. Заголовок Главного окна (верхняя строка) и Главное меню

На верхней панели расположено две строки:

1. Заголовок Главного окна.
2. Главное меню.

Главное меню (Рис.21) состоит из опций: «Спектр», «Анализатор», «Параметры», «Окна» и «Справка».

Рабочее окно предназначено для набора и визуализации спектра, а также для выполнения различных операций по представлению изображения в различной виде и сохранению на внешний носитель измененной версии представленного спектра.

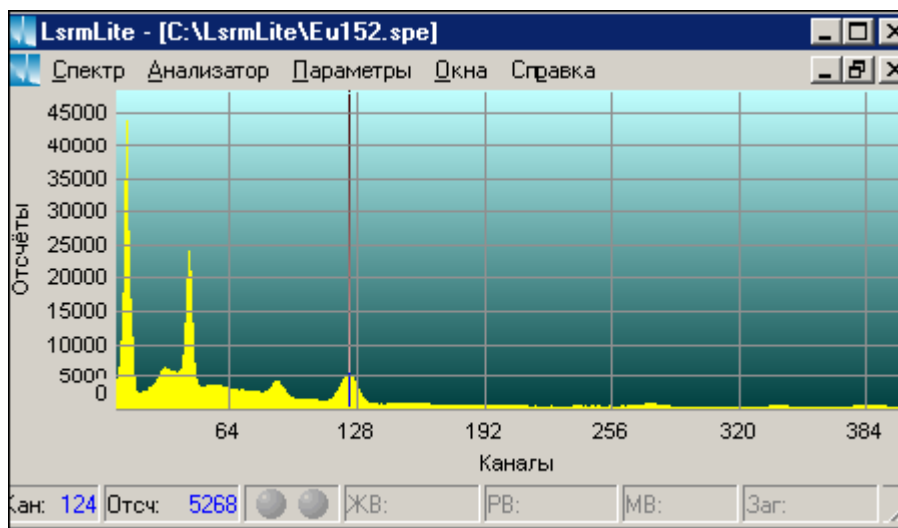


Рисунок 22.
В Рабочем окне
изображение спектра
пробы

Рабочее окно служит также для просмотра ранее сохраненных спектров.

В строке состояния, расположенной в самом низу Главного окна программы, расположены индикаторы состояния анализатора (Рис.22).

Описание меню «Спектр»

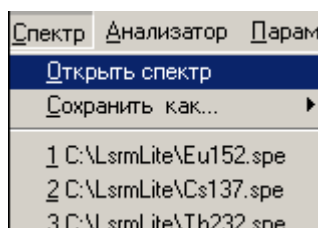


Рисунок 23. Меню «Спектр»

Меню «Спектр» (Рис.23) включает в себя команды для открытия, закрытия, сохранения файлов спектров: «Открыть спектр», «Выход», «Сохранить как ...».

Для команды «Сохранить как ...» есть подменю, об этом сообщает стрелка справа от команды (Рис.24).

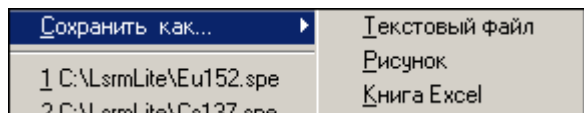


Рисунок 24

Многоточие (...) указывает на то, что перед выполнением команды появляется диалоговое окно. По команде «Открыть спектр» в Рабочем можно открыть ранее сохраненные спектры типа *.spe, *.sps, *.txt (Рис.25).

Ниже показаны четыре названия последних вызванных из буфера спектров и их расположение.

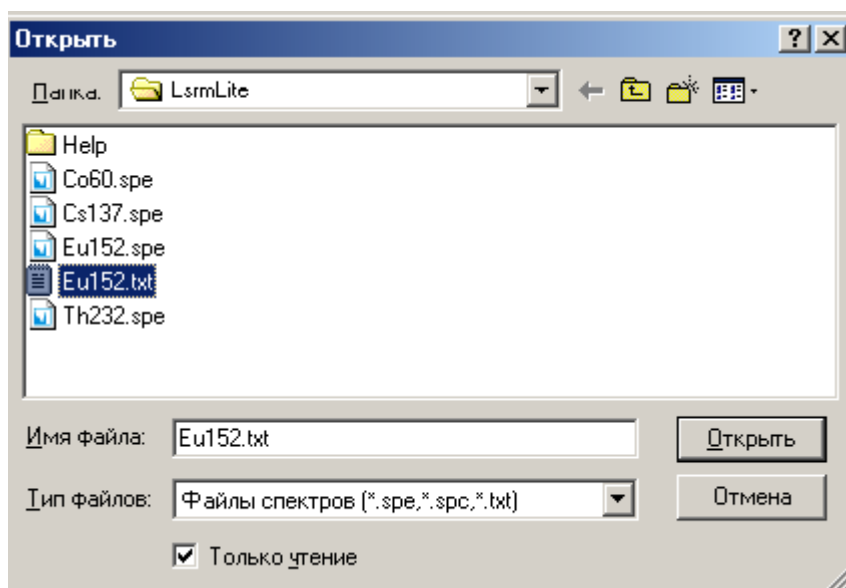


Рисунок 25

Файл спектра можно сохранить (Рис.25), как текстовый файл (*.txt), рисунок (*.bmp,*.jpg), и как книгу Excel (*.xls).

Открытые спектры типа *.spe, *.sps можно переформатировать в формат *.txt, *.bmp, *.jpg, *.xls (Сохранить, как...).

Описание меню «Анализатор»

Меню «Анализатор» (Рис.26) включает функции настройки анализатора и функции управления анализатором.

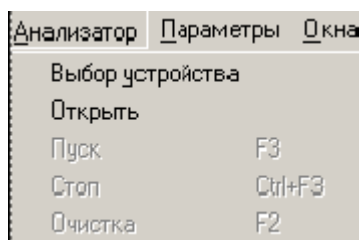


Рисунок 26. Меню «Анализатор»

«Выбор устройства» - установка параметров анализатора.

«Открыть» - открывает Рабочее окно набора спектров и делает активными кнопки управления Анализатором.

«Пуск F3» - запускает набор активного окна анализатора.

«Стоп Ctrl+F3» - останавливает набор активного окна анализатора

«Очистка F2» - обнуляет буфер анализатора.

(ВНИМАНИЕ! МЕНЮ «ВЫБОР УСТРОЙСТВА» НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ!)

Описание меню «Параметры»

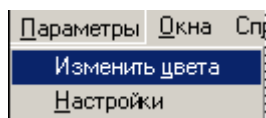


Рисунок 27. Меню «Параметры»

Меню «Параметры» (Рис.27) предназначено для настройки цветовой палитры Рабочего окна и для настройки параметров конфигурации.

Опция «Изменить цвета»

По команде «Изменить цвета» вызывается диалоговое окно «Выбор цветов» (Рис.28).

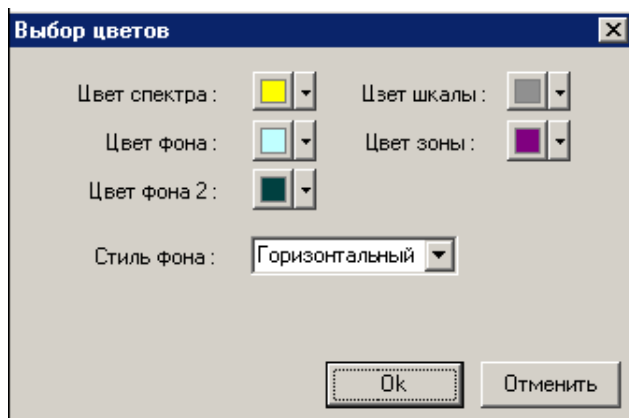


Рисунок 28. Опция «Выбор цветов»

Окно состоит из большого числа настроек: Цвет спектра, Цвет фона, Цвет фона 2, Цвет шкалы, Цвет выделяемых зон, Стиль фона. Настройки позволяют создать такую цветовую гамму Главного окна, которая удовлетворит даже искушенного пользователя. Процедура подбора цвета для спектра, фона, шкалы, выделяемых зон осуществляется одинаково.

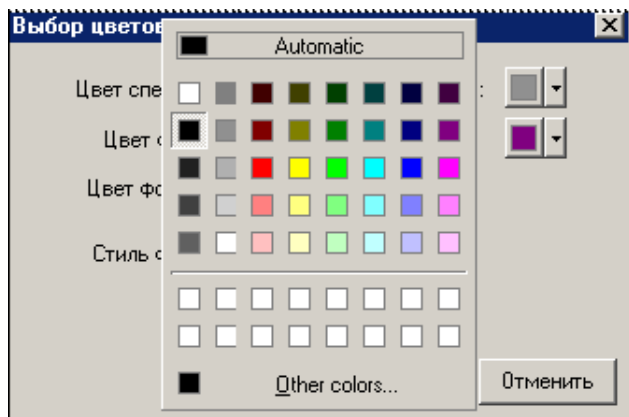


Рисунок 29. Палитра цветов

Для выбора цветов Пользователю нужно воспользоваться стандартными для Windows инструментами. Например, чтобы изменить цвет спектра, надо щелкнуть по квадратику с стрелкой, находящемуся справа от надписи «Цвет спектра» и вызвать палитру цветов (Рис.29).

После того, как щелкните по выбранному цвету, палитра закрывается, а в позиции напротив надписи «Цвет спектра» в диалоговом окне «Выбор цветов» (Рис.28) устанавливается выбранный цвет.

Если Пользователю недостаточно цветов в палитре, необходимо щелкнуть по клавише «Other colors» («другие цвета»), вызвать расширенную палитру с многообразием цветовых оттенков (Рис.30) и добавить в набор требуемый цвет.

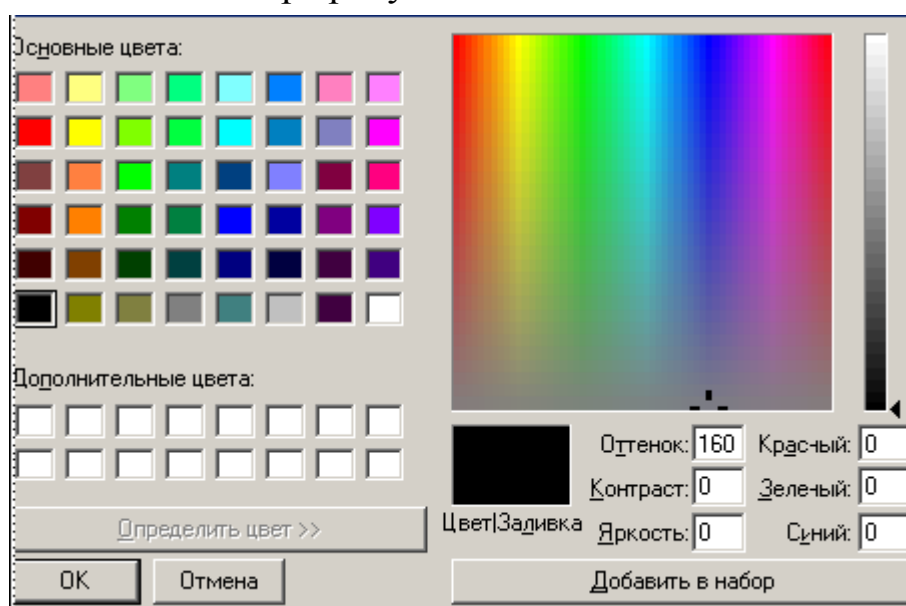


Рис.30. Расширенная палитра цветов

Опция «Стиль фона»

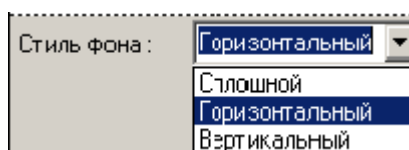


Рис.31. Опция «Стиль фона»

Опция «Стиль фона» (Рис.31) позволяет выбрать необходимый стиль для оформления фона Рабочего окна программы. В программе спектр гамма-излучения располагается на переднем плане Рабочего окна, и его цвет задается в диалоговом окне «Выбор цветов» (Рис.28), а фон располагается на заднем плане Рабочего окна, образуя основу, на которой изображается спектр. В программе предусмотрено три стиля фона: сплошной (1 цвет), горизонтальная заливка в два цвета, вертикальная заливка в два цвета. При сплошной заливке фон Рабочего окна (Рис. 32)

представлен одним цветом, выбранным из палитры цветов. При горизонтальной заливке фон (Рис.33) будет создан из двух цветов, плавно переходящих из одного в другой по горизонтали Рабочего окна. При вертикальной заливке участвуют также два цвета, но при этом образуют фон (Рис.34) с переходящими из одного цвета в другой вертикальными полосами.

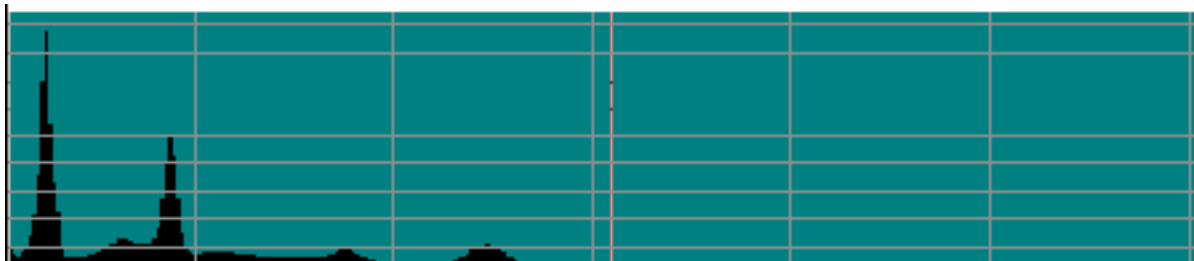


Рисунок 32. Заливка одним цветом – сплошная



Рисунок 33. Горизонтальная заливка в два цвета



Рисунок 34. Вертикальная заливка в два цвета

Опция «Настройки»

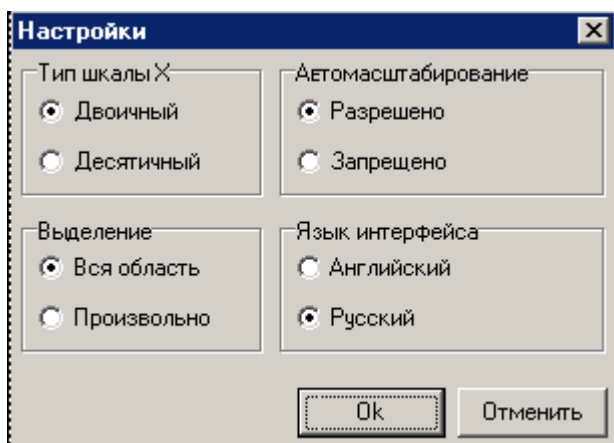


Рис.35 Диалоговое окно «Настройки»

Опция «Настройки» (Рис.35) предназначена для настройки программы и состоит из четырех параметров:

1. Шкала по оси X - предлагается выбрать бинарную или десятичную шкалу.

2. Выделение - предлагается указать, каким образом будет производится выделение.

3. Автомасштабирование - предлагается указать запрещено или разрешено автомасштабирование спектра.

4. Язык интерфейса - выбрать из двух языков интерфейса: английский или русский.

Ниже рассмотрен подробно каждый из параметров настройки конфигурации.

Параметр «Тип шкалы».

Параметр «Тип шкалы X» позволяет определить число отсчетов по горизонтальной оси: кратное «2» или кратное «5». При параметре «Бинарная» (кратное «2») в выделенном участке спектра программа ищет на левой границе первое число, близкое степени двойки, и обозначает левую границу участка. Аналогично происходит разметка на правой границе. Внутри участка программа производит разбивку на четыре части и проставляет деления при минимальном размере шага «2». Например, 128, 256, 384, 512 и т.д.

При параметре «Десятичная» (кратное 5) действия по разметке спектра повторяются, с той разницей, что вместо 2 берется за основу 5. Например, 100, 200, 300 и т.д.



Рисунок 36.

На

Рис.36 показаны значения каналов по оси X для одного и того же участка спектра при разных типах шкалы.

Параметр «Выделение»

Параметр «Выделение» предназначен для задания типа выделения спектра. Программа может производить два вида выделения областей спектра: полное и произвольное.

Метод полного выделения «Вся область» заключается в том, чтобы установить выделяющую рамку на интересующий участок спектра. Для этого надо установить линию метки (всегда присутствует в Рабочем окне) на начало нужного диапазона, нажать на правую клавишу мыши и плавно повести вправо или влево (в нужном направлении), не отпуская клавишу мыши. В Рабочем окне будет видно, как происходит выделение большой прямоугольной рамкой, захват информации происходит при изменении параметров по оси X, при фиксированном значении Y. После того как Вы достигнете предполагаемой конечной точки участка, надо прекратить удерживание клавиши.

После этой операции участок спектра растянется на нужную величину по оси X.

Метод произвольного выделения заключается в том, что вы можете выбрать какой-либо кусок пика, либо интересный фрагмент аппаратной линии, не ограничиваясь параметрами X и Y. Инструмент выделения в этом случае иной – это произвольно растягиваемая по осям X и Y прямоугольная рамка.

Лучше всего разница между методами выделения окна видна из примеров.

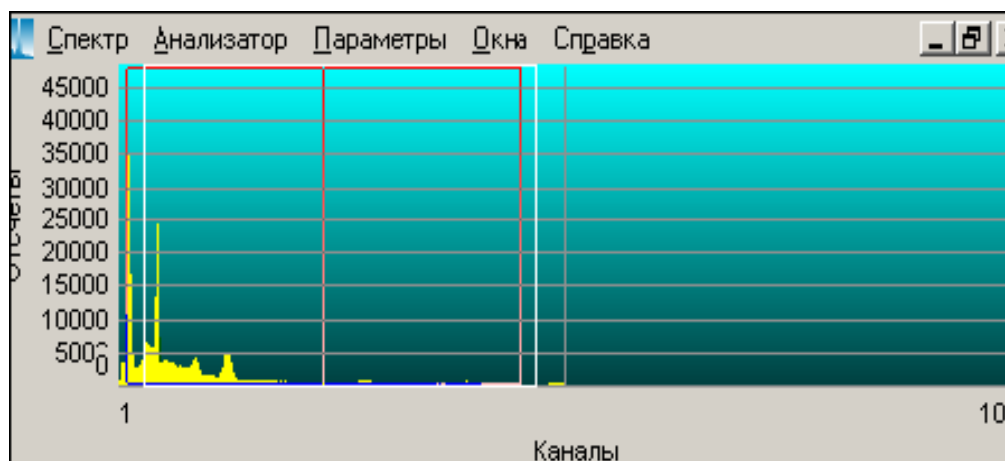


Рисунок 37.
Спектр с
выделением
«Вся область»

При включенном флаге «Вся область» (Рис.37) можно выделить область спектра, но с ограничениями: по оси Y значения всегда от «0» до максимальной отметки данного спектра, а по оси X - произвольно выделенный участок. В примере от 1 до 1000 каналов. Положение курсорной линии указывает середину выделенного участка.

На рис.38 показан результат выделения типа «Вся область». Как видно изображение спектра по оси Y не изменилось, а по оси X растянуто до размеров, заданных выделяющей рамкой.



Рисунок 38.
Спектр после
выделения
«Вся область»

Весь диапазон Рабочего окна теперь занимает выделенный участок спектра, курсорная линия не изменила своего положения по-прежнему делит выделенный участок пополам.

При включенном флаге «Произвольно» (Рис.39) можно выделить часть спектра, пика без каких-либо ограничений - по оси X и Y произвольно выделенный участок.

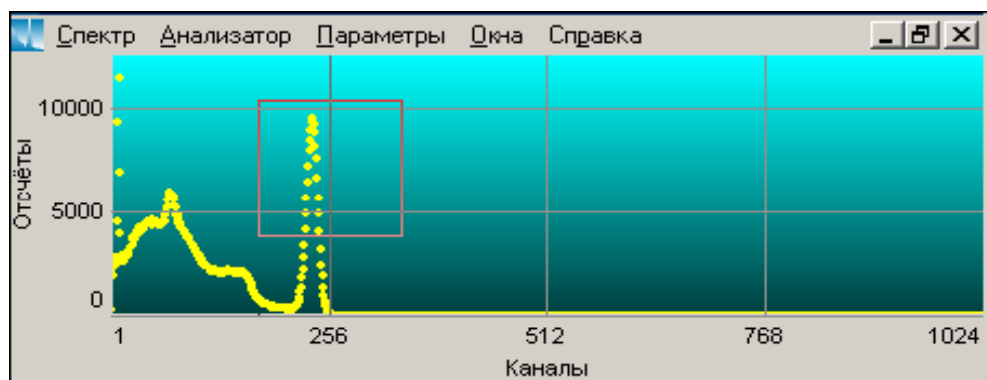


Рисунок 39.
Спектр с
произвольно-
выделенной
областью.



Рисунок 40.
Выделенный
участок спектра
при произволь-
ном выделении.

В примере (Рис.40) выделена верхняя часть аппаратурной линии, занимающая по оси Y от 0 до 10000 импульсов и по оси X от 1 до 1024 каналов.

Положение курсорной линии указывает на середину выделенного участка по оси X.

Выделенный диапазон представлен в Рабочем окне на рис.40. Спектр не только растянут по оси X, но и увеличен по оси Y.

В обоих методах выделения можно производить «довыделения» много раз, растягивая изображение до требуемых размеров. Для возврата к исходным размерам спектра достаточно щелкнуть дважды по Рабочему окну и спектр вернется в исходное положение.

Параметр «Автомасштабирование»

Параметр «Автомасштабирование» (Рис.35) предусматривает установление двух видов масштабирования:

«Разрешено»

«Запрещено»

При установленном флаге «Запрещено» в программе запрещается автомасштабирование при выделении спектра.

При установленном флаге «Разрешено» происходит автомасштабирование при выделении фрагментов спектра.

Программа находит максимум пика, прибавляет 10% высоты пика и выделяет информативный участок, автоматически масштабируя его по размеру Рабочего окна.

Параметр «Язык интерфейса»

Программа предусматривает использование двух языков интерфейса: английский и русский. В зависимости от потребности можно переключать диалоговое общение с языка на язык, установив в нужной позиции флаг (Рис.35). После этой операции нужно обязательно перезапустить программу.

Описание меню «Окна»

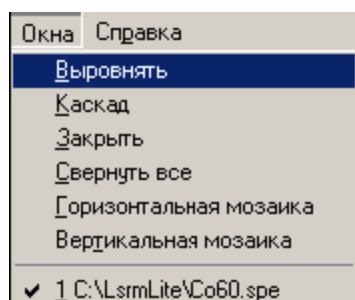


Рисунок 41. Меню «Окна»

Меню «Окна» (Рис.41) предназначено для создания индивидуальной рабочей обстановки для каждого Пользователя на экране рабочего окна. Для этого есть несколько вариантов размещения на Рабочем столе окон с открытыми спектрами: Каскадом, Горизонтальная мозаика, Вертикальная мозаика. Также есть дополнительные команды «Закрыть», «Выровнять», «Свернуть все» - команды, относящиеся к закрытию и минимизации окон в низ экрана. Внизу меню «Окна» показывается список уже открытых окон спектров. На рисунках 42-44 показаны примеры расположения Рабочих окон в Главном окне. Число открытых окон ограничивается физическими ресурсами оперативной системы. При большом числе открытых окон на правой стороне Главного окна появляется боковая прокрутка. Также управлять закрытием, минимизацией и восстановлением размера можно с помощью стандартных кнопок управления, расположенных в правом верхнем углу каждого открытого окна.

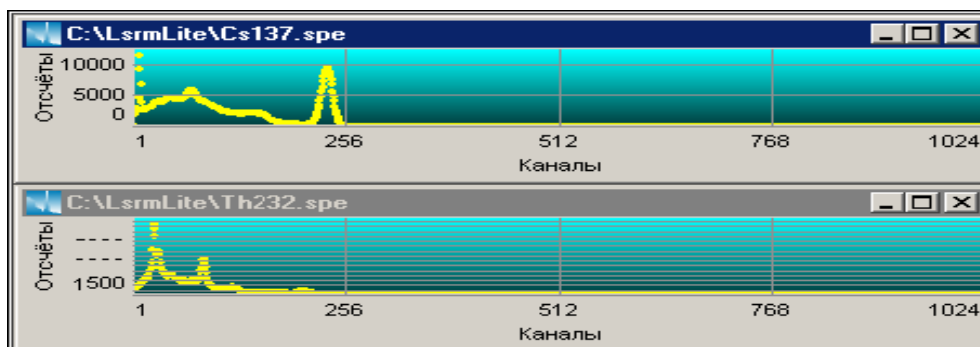


Рисунок 42.
Горизонтальная
мозаика

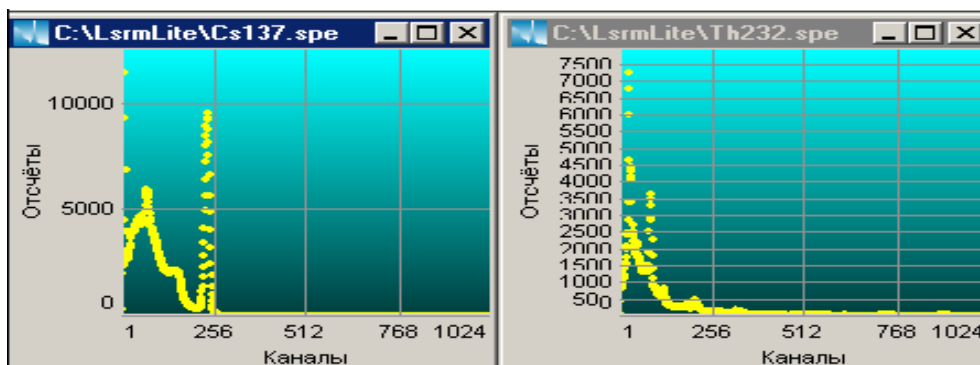


Рисунок 43.
Вертикальная
мозаика

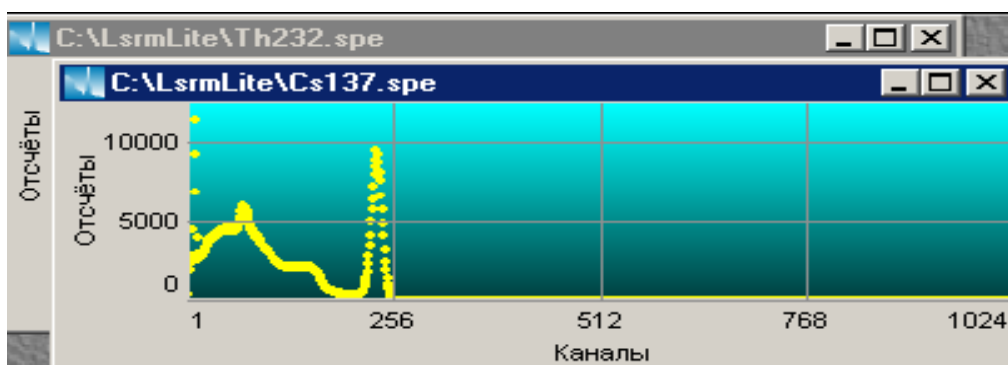


Рисунок 44.
Каскад

Описание функций Анализатора

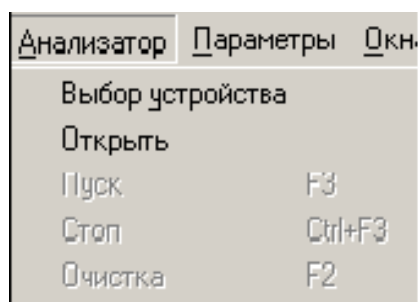


Рисунок 45. Меню «Анализатор»

В Главном окне расположено несколько панелей, на которых расположены кнопки управления анализатором и индикаторы состояния анализатора. В Главном меню в подменю «Анализатор» (Рис.45) расположены основные опции и команды управления Анализатором: «Выбор устройства», «Открыть», «Старт», «Стоп», «Очистить».

Для открытия Рабочего окна набора и просмотра спектров найдите в Главном меню подменю «Анализатор» и нажмите на команду «Открыть». Через несколько секунд после этого действия на экране компьютера откроется Рабочее окно анализатора (Рис.45). На первой строке верхней панели Главного окна расположен «Заголовок Главного окна», в котором указывается название окна «активного» спектрометрического тракта.



Рисунок 46. Заголовок окна

В Заголовке Главного окна (Рис.46) также индицируется название спектрометрического тракта, над которым в данный момент производятся какие-либо действия: введение параметров спектра, просмотр спектра, обработка спектра и т.д. Если открыто несколько окон, то в заголовке каждого открытого окна указывается название спектрометрического окна или вызванного из накопителя спектра

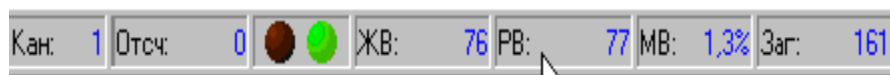


Рисунок 7. Анализатор в режиме накопления спектра

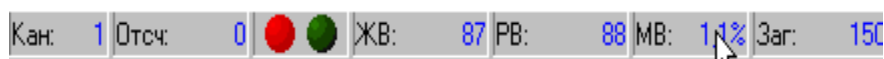


Рисунок 48. Анализатор в режиме ожидания

Внизу Главного окна на строке состояния расположены цветные круглые индикаторы состояния спектрометрического тракта (Рис.47 и 48).

В зависимости от состояния анализатора индикаторы изменяют свой цвет: при отключенном анализаторе левый индикатор окрашивается в красный цвет, при включенном анализаторе правый индикатор зеленого цвета. Ниже приведены обозначения, используемые в строке состояния.

«Кан.» - Каналы – значение канала, отмеченного курсором.

«Отсч.» - Отсчеты – число импульсов, зарегистрированных в этом канале.

«ЖВ» - Живое время – значение «живого» времени в секундах.

«РВ» - Реальное время - значение «реального» времени в секундах.

«ИВ» - Мертвое время – значение «мертвого» времени в процентах.

«Заг» - Загрузка – значение текущей загрузки анализатора.

Назначение функций правой и левой клавиши мыши

Описание функций правой клавиши мыши

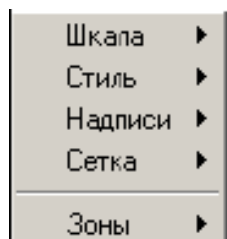


Рисунок 49. Всплывающее меню

Если курсор мыши находится в пределах окна спектра, то при нажатии правой кнопки мыши появляется Всплывающее меню (Рис.49):

Опция "Шкала" - позволяет представить спектр либо в логарифмическом масштабе, либо в линейном масштабе.

Опция "Стиль" - позволяет визуализировать спектр различными способами.

Опция «Оси» - позволяет добавлять и убирать оси X и Y из Рабочего окна.

Опция «Сетка» - позволяет настроить присутствие или отсутствие подписей к осям координат графика.

Опция «Зоны» - позволяет выделить зоны интереса в спектре.

Опция «Шкала»

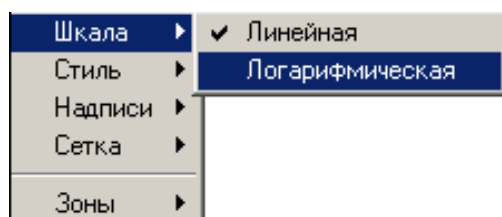


Рисунок 50. Опция «Шкала»

Опция "Шкала" (Рис.50) позволяет изменить вид спектра: линейная шкала - спектр в линейном виде (Рис.51), логарифмическая шкала - спектр в логарифмическом виде (Рис.52)



Рисунок 51. Линейная шкала

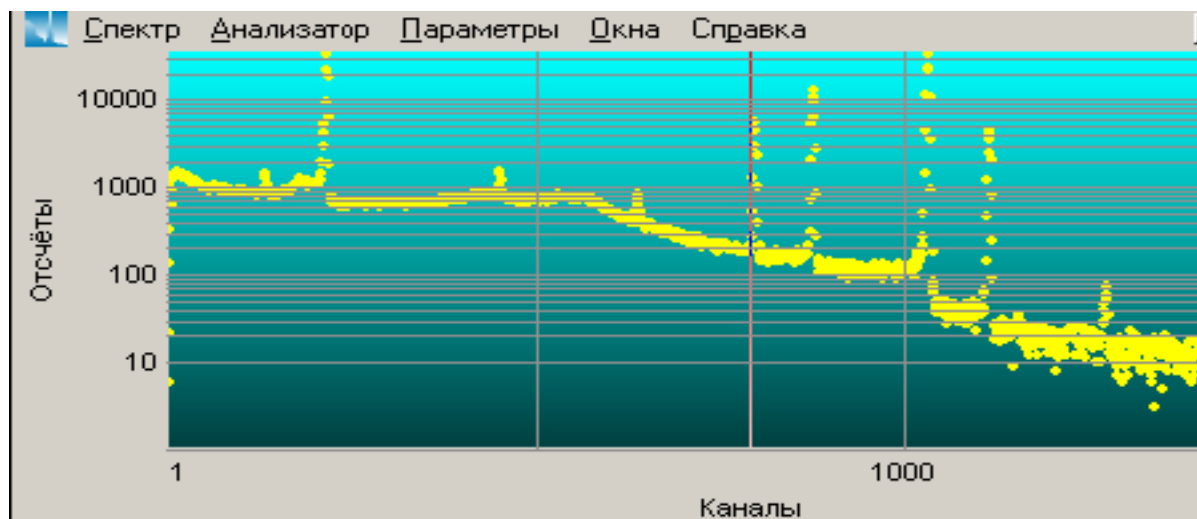


Рисунок 52. Логарифмическая шкала

Опция «Стиль»

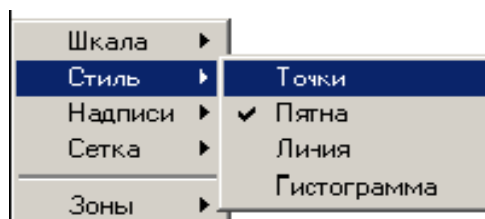


Рисунок 53. Опция «Стиль»

Опция «Стиль» (Рис.53) позволяет выбрать тот или иной стиль отображения спектра.

При установленном флаге «Точки» (Рис.54) спектр будет представлен в виде непрерывной цепочки точек, образующей графическое представление спектральной информации. Аналогично при флаге «Пятна» (Рис.57) будет представлен в виде пятен, при флаге «Линии» (Рис.55) спектр будет в виде непрерывной линии, а при флаге «Гистограмма» (Рис.56) спектр – в виде гистограммы.

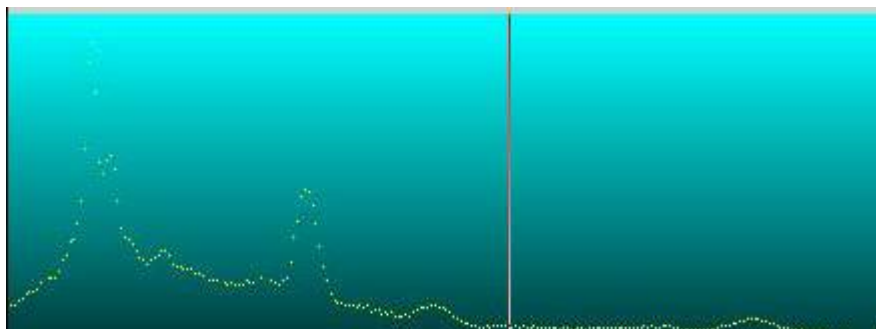


Рисунок 54. Спектр представлен точками

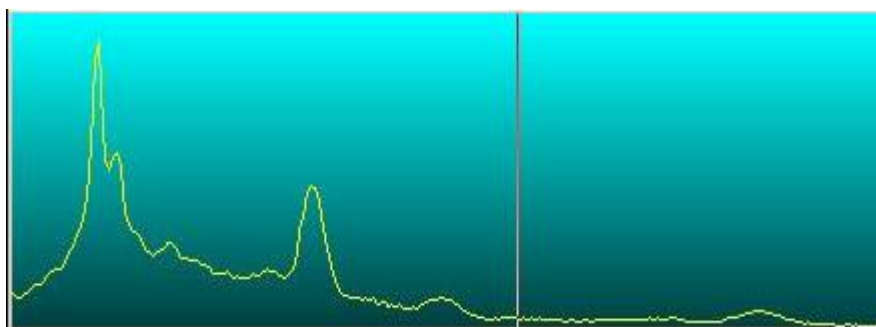


Рисунок 55. Спектр представлен непрерывной линией

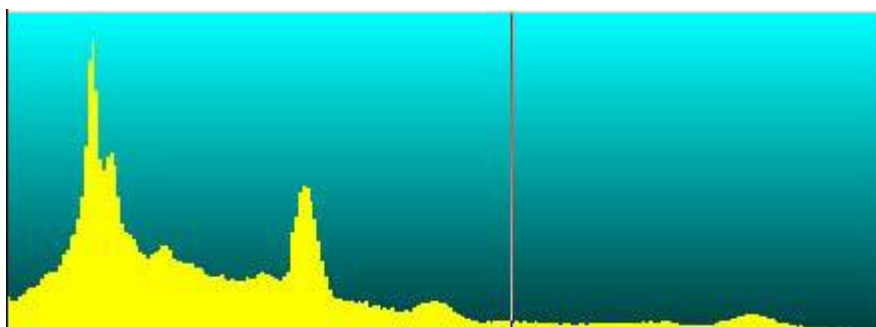


Рисунок 56. Спектр представлен гистограммой

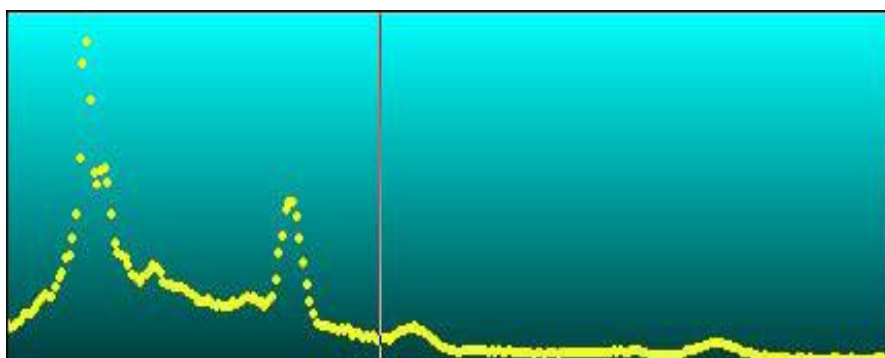


Рисунок 57. Спектр представлен пятнами

Опция «Надписи»

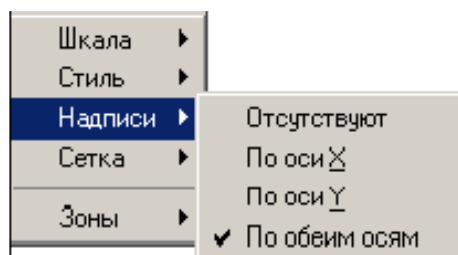


Рисунок 58. Опция «Надписи»

Опция «Надписи» (Рис.58) добавляет, убирает ось X, ось Y и надписи к сям из Рабочего окна. При флаге «Отсутствуют» оси с надписями в Рабочем окне отсутствуют. При флаге «По оси X» появляются метки делений по оси X и надписи. При флаге «По оси Y» появляются метки делений по оси Y и надписи. При флаге «По обеим осям» обе оси присутствуют в Рабочем окне.

Опция «Сетка»

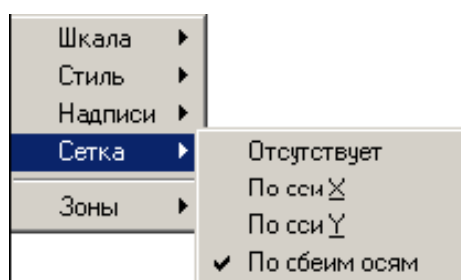


Рисунок 59. Опция «Сетка»

Опция «Сетка» (Рис.59) позволяет разметить спектр с помощью сетки по осям X и Y. При флаге «Отсутствует» сетка в Рабочем окне отсутствует. При флаге «По оси X» появляются линии сетки по оси X. При флаге «По оси Y» появляются линии сетки по оси Y. При флаге «По обеим осям» линии сетки размечают Рабочее окно по оси X и оси Y.

Опция «Зоны»

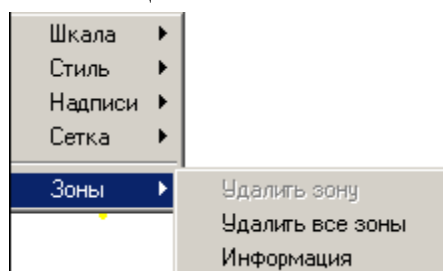


Рисунок 60. Опция «Зоны»

Опция «Зоны» (Рис.60) становится активной только после выделения зон интереса в спектре. Для выделения зон при нажатой клавише Ctrl нажмите левую клавишу мышки, установите курсор на начальную точку

выделения участка спектра и, не отпуская нажатую клавишу, выделите нужный участок спектра. Спектр с выделенными зонами представлен на рис.61.

Зон можно выделять несколько, причем при перекрывании двух зон третьей зоной происходит выделение новой зоны спектра с удалением старых. Информацию о выделенных зонах можно просмотреть, вызвав диалоговое окно «Информация о зонах». Для этого нажмите на правую клавишу мыши, вызовите всплывающее меню, найдите окно «Зоны» - «Информация». Пример диалогового окна «Информация о зонах» представлен на рис.62. Данные по зонам можно сохранить как книгу Excell, так и в простом текстовом формате.

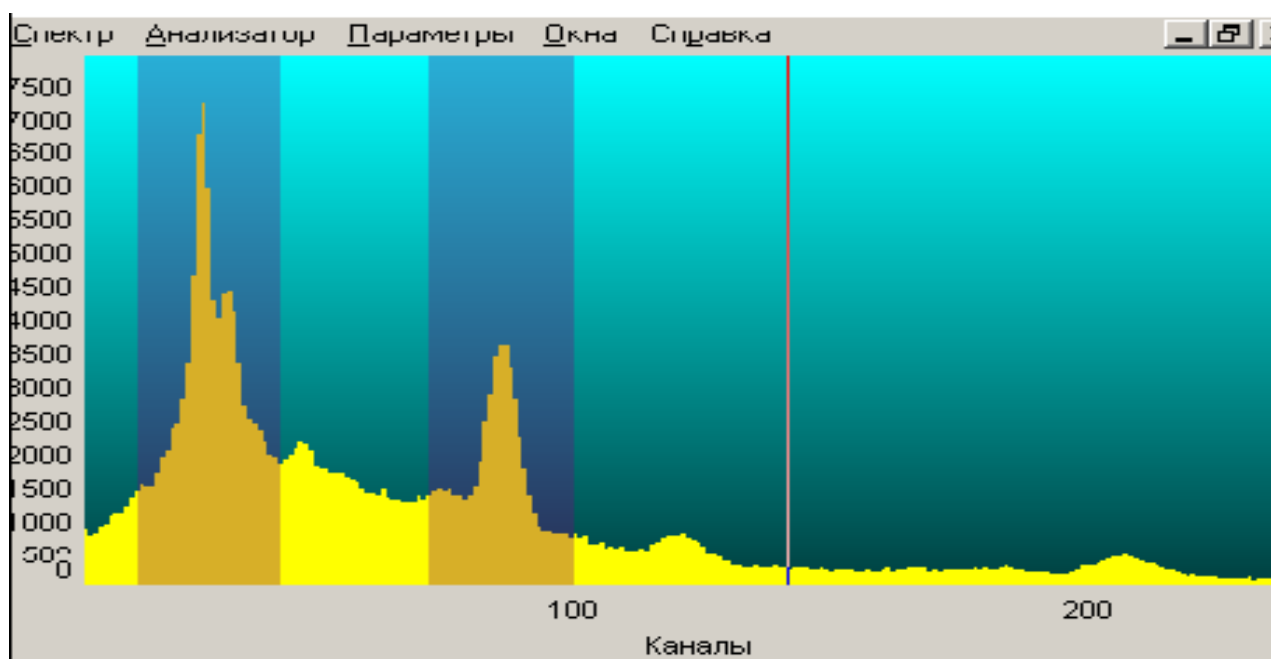


Рисунок 61. Спектр с выделенными зонами

Информация о зонах				
Номер	Начало	Конец	Счёт	Скорость счёта
1	31	108	328252	182.36222
2	217	225	14781	8.21167
3	200	250	159182	88.43444

Сохранить в Excel Сохранить в текст OK

Рисунок 62. Диалоговое окно «Информация о зонах»

Описание функций левой клавиши мыши

Левая клавиша мыши предназначена для повышения оперативности работы с программой. Достаточно одного щелчка по левой клавише и необходимая опция будет выполнена.

Растягивание спектра до необходимого размера по оси X.

Для того, чтобы растянуть спектр по оси X, надо установить курсор на начале необходимого участка спектра (щелкните мышкой в нужной точке на горизонтальной оси), при этом визуально видна вертикальная линия, отмечающая край выделяемого участка. Затем, удерживая левую клавишу мыши, начинайте плавно выделять участок спектра в нужную Вам сторону по горизонтали. Вместе с передвижениями мыши по спектру будет передвигаться вторая граница выделяемого участка (будет видно передвижение вертикальной линии). После того, как Вы выделите участок спектра, отпустите левую клавишу мыши, и участок спектра растянется на необходимый Вам размер по горизонтальной оси X.

Возврат исходных размеров спектра по оси X.

Для того чтобы вернуть первоначальные размеры спектра после растяжения спектра по горизонтальной шкале X, надо дважды щелкнуть по левой клавише мыши. Размеры спектра вернуться к первоначальному состоянию.

Назначение вспомогательных кнопок

Вспомогательные кнопки предназначены для управления работой программы, не прибегая к помощи мышки.

F1 – вызов справки, F2 – очистка буфера анализатора, F3 – старт анализатора, Cntr+F3 – остановка анализатора, стрелка вправо, стрелка влево – перемещение маркера по спектру, стрелка вверх, стрелка вниз – изменение масштаба по оси X, Home – возврат к первоначальному масштабу.

Вызов ранее измеренных спектров

Для того, чтобы вызвать ранее измеренные спектры в Главное окно программы, надо проделать:

1. В меню «Спектры» вызвать опцию «Открыть», найти в открывшемся списке нужный файл спектра и открыть его.
2. Или в Главном меню на верхней панели найти кнопку быстрого доступа «Открыть» и найти в открывшемся списке нужный файл спектра и открыть его.

Задание по лабораторной работе

1. Изучит ряды урана и тория. Особое внимание обратить на основные гамма-излучатели этих рядов.
2. Изучить основные положения гамма-спектрометрии.
3. Ответить на контрольные вопросы.
4. Изучить устройство ГАММА-1С и программное обеспечение.
5. **Только после выполнения первых четырех пунктов преподаватель дает разрешение на работу с гамма-спектрометром!**
6. Провести измерение образца, находящегося в свинцовом контейнере, накопление в течение 20 минут..
7. Расшифровать полученный спектр, определить радиоактивный элемент.
8. Перевести содержание радиоактивных элементов из Бк/кг в процентное весовое содержание, учитывая что вес пробы 0.7 кг.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные гамма-излучатели рядов урана и тория (включая их энергию).
2. Зачем нужно знать эффективность регистрации сцинтилляционного детектора при работе с ГАММА-1С?
3. Где выше представительность опробования – у лабораторных или у полевых гамма-спектрометрах? Почему?
4. Каковы основы определения содержания естественных радиоактивных элементов гамма-спектрометрией?
5. Какова активность 1 грамма равновесного урана (тория, калия-40) в Беккерелях?
6. Почему в устройстве ГАММА-1С регистрируется практически весь спектр радиоактивных излучений?

Литература

1. Ларионов В.В., Резванов Р.А. Ядерная геофизика и радиометрическая разведка / Учебник для ВУЗов – 3-е изд. - М.: Недра, 1988 – 325 с.
2. Разведочная ядерная геофизика. Справочник геофизика. М., Недра, 1977, 296 с.

Работа 5. Изучение портативного рентгеновского флуоресцентного анализатора Bruker Turbo S1, определение содержания рудного компонента в пробах

Физические основы метода.

Поглощение γ -квантов электронами атомов. Фотоэффект.

Фотоэффектом называется такой процесс взаимодействия γ -кванта с электроном, при котором электрону передается вся энергия γ -кванта. При этом электрон выбрасывается за пределы атома с кинетической энергией $E_e = E_\gamma - I_i$ где E_γ – энергия γ -кванта; I_i – потенциал ионизации i -оболочки атома. Освободившийся в результате фотоэффекта место на электронной оболочке заполняется электронами с вышерасположенных орбит. Этот процесс сопровождается испусканием характеристического рентгеновского излучения, либо испусканием электронов Оже.

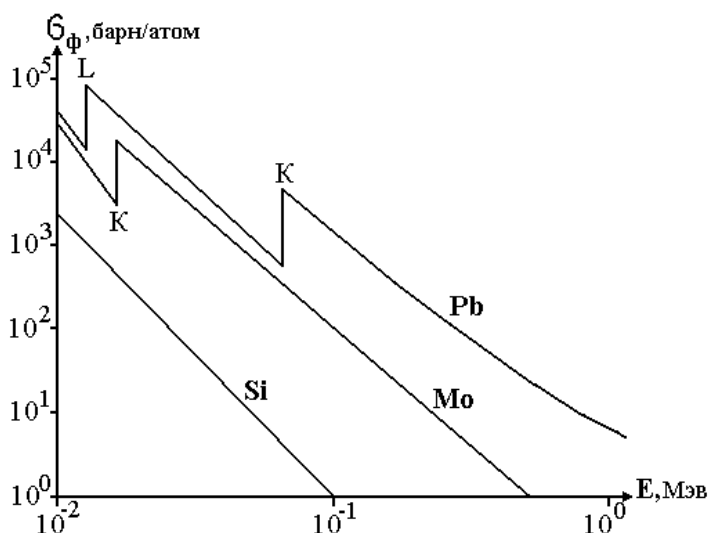


Рисунок 63. Сечение фотоэффекта для различных элементов

Чем меньше энергия связи электрона с атомом, по сравнению с энергией γ -кванта, тем менее вероятен фотоэффект. Это обстоятельство определяет все основные свойства фотоэффекта: ход сечения в зависимости от энергии γ -кванта; соотношение вероятности (сечения) фотоэффекта на разных электронных оболочках атома; зависимость сечения от Z вещества.

Вероятность фотоэффекта тем больше, чем меньше разность энергий потенциала ионизации i -оболочки и энергией γ -кванта. Для γ -кванта с энергией, значительно превышающей энергию связи электрона с атомом, электрон оказывается свободным и фотоэффект становится маловероятным, более вероятно комптоновское рассеяние. По мере

убывания E_γ сечение фотоэффекта возрастает. Рост σ_ϕ продолжается до тех пор, пока E_γ не станет равной потенциалу ионизации I_K (энергии связи) К-оболочки. Начиная с $E_\gamma > I_K$, фотоэффект на К-оболочке становится невозможным и сечение фотоэффекта определяется только взаимодействием γ -квантов с электронами L-оболочки, далее M-оболочки и т.д. Но электроны этих оболочек связаны с атомом слабее, чем электроны К-оболочки. Поэтому при равных E_γ вероятность фотоэффекта электрона с L-оболочки (а тем более с M-оболочки) существенно меньше, чем с К-оболочки. В связи с этим на кривой сечений фотоэффекта наблюдается резкий скачок при переходе с К-оболочки на L-оболочку.

Для одного и того же вещества для К-оболочки ход сечения фотоэффекта приблизительно оценивается:

$$\text{при } E_\gamma > I_K \quad \sigma_\phi \approx 1/E_\gamma^{3.5};$$

$$\text{при } E_\gamma \gg I_K \quad \sigma_\phi \approx 1/E_\gamma.$$

Вероятность (сечение) фотоэффекта очень резко зависит от вещества (заряда Z атома), на котором происходит фотоэффект: $\sigma_\phi \approx Z^5$. Это объясняется различной энергией связи электрона в различных веществах. В легких элементах, при $Z < 25$, электроны связаны кулоновскими силами относительно слабее, чем в элементах с $Z > 50$ (тяжелые элементы).

Характеристическое излучение элементов.

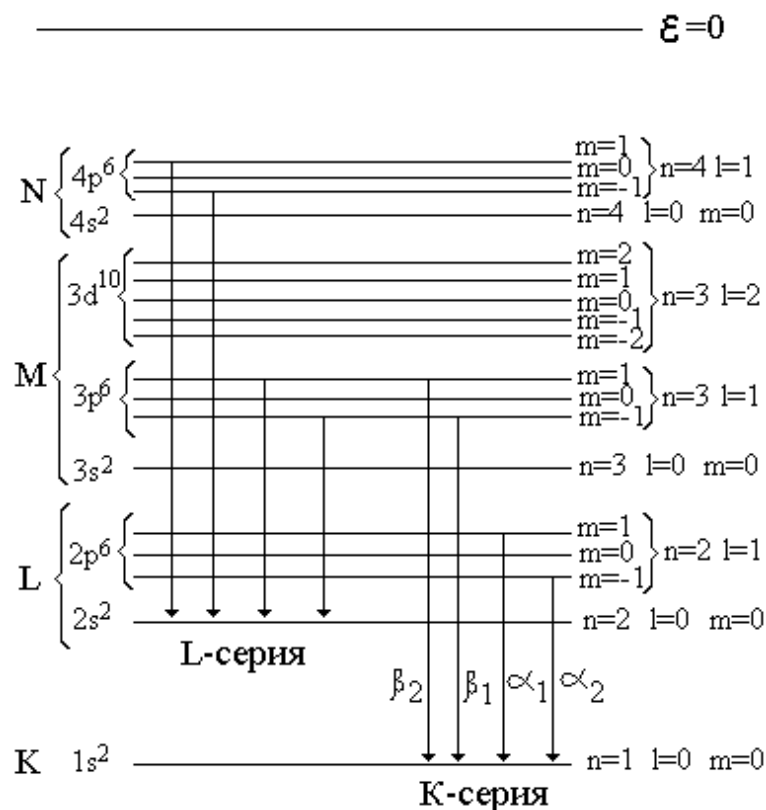


Рисунок 64. Механизм возникновения характеристического излучения.

В результате фотоэффекта электрон выбрасывается за пределы атома, т.е. происходит ионизация атома. Поскольку электроны, окружающее атомное ядро, находятся на определенных энергетических уровнях (К, L, М и т.д.), при удалении одного из электронов, образуется вакансия и атом оказывается в возбужденном состоянии. Всякое возбужденное состояние энергетически неустойчиво и через очень короткий промежуток времени (от 10^{-16} до 10^{-7} сек) происходит заполнение образовавшейся вакансии электроном с более удаленного уровня, понижая возбуждение. Разность энергий, между уровнями состояния электрона, высвобождается испусканием фотона характеристического излучения.

Так как энергетические уровни электронных оболочек для каждого вещества имеют строго фиксированные значения, то и энергия излучения фотона для каждого элемента строго фиксирована (характерна).

Согласно квантовой теории, электроны в атоме располагаются на стационарных орбитах, заполнение которых идет с орбиты с минимальным уровнем энергии.

Для характеристик этих энергетических уровней служат так называемые квантовые числа: n – главное квантовое число, равное 1, 2 0;

l – орбитальный момент, $l = n-1, n-2 \dots 0$; m_l – магнитный момент, $m_l = \pm |l|, = \pm |l-1| \dots 0$; s – спиновое число, равно $\pm 1/2$.

Характеристическое излучение, испускаемое атомами, имеет линейчатый дискретный спектр, который состоит из нескольких групп или серий линий (К-, L-, М-серии и т.д.). Наиболее высокоэнергетичной (до нескольких десятков КэВ) является К-серия, далее, в порядке уменьшения, следуют L-серия (до 10 КэВ), М-серия (до 1 КэВ) и т.д.

Излучение К-серии возникает при переходе электрона с более удаленного уровня на К-уровень, при этом энергия испускаемого кванта равна разности энергий уровня, из которого вышел электрон и К-уровня. В том случае, когда появляется вакансия на L-уровне, возникают линии спектра L-серии. При этом неважно, удален ли электрон с L-уровня вследствие внешних причин (фотоэффекта) или в результате перехода электрона с L-уровня на К-уровень. Если атомы данного элемента испускают линии К-серии, то при наличии возможности, в спектре всегда будут присутствовать линии L-серии.

Спектры характеристического излучения данной серии для различных элементов одинаковы по структуре, то есть по числу и взаимному расположению линий, и отличаются друг от друга только

энергией. Наименьшее число линий имеет К-серия ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$), причем $E\beta_2 > E\beta_1 > E\alpha_1 > E\alpha_2$. В связи с тем, что вероятность переходов электронов с уровня на уровень разная, при возбуждении большого количества фотонов всех линий К-серии, интенсивность их будет различной. Соотношение интенсивностей К-серии для одного и того же вещества таково: $K\alpha_1 : K\alpha_2 : K\beta_1 : K\beta_2 \equiv 100 : 50 : 25 : 5$. Аналогичные условия выполняются и для L-серии: $L\alpha_{1-2} : L\beta_{1-4} : L\gamma \equiv 100 : 80 : 9$.

При заполнении вакансии электроном с более высокого уровня не всегда возникает фотон характеристического излучения. В некоторых случаях избыток энергии атома может уноситься не фотоном, а электроном (эффект Оже). Такой переход между двумя состояниями атома называется безрадиационным и его можно рассматривать как внутриатомное поглощение характеристического излучения. Если с К-уровня удален электрон, то возникающий фотон характеристического излучения обладает энергией, достаточной для возбуждения L-уровня. В результате такого внутриатомного фотоэффекта фотон К-серии поглощается и атом испускает L-электрон (оже-электрон). L-уровень оказывается в состоянии двойной ионизации и атом переходит в нормальное состояние путем излучения фотона L-серии или безрадиационным путем, с испусканием еще одного электрона с более удаленного уровня.

Эффект Оже конкурирует с процессом образования фотонов характеристического излучения и приводит к снижению выхода характеристического излучения (Х.И.). Отношение числа атомов, испустивших Х.И. (Nq_x) к общему числу атомов, возбужденных на q-уровень (Nq) определяет коэффициент выхода Х.И. для q-уровня: $Wq = Nq_x / Nq$. Приблизительное значение этого коэффициента можно найти по эмпирической формуле:

$$W_q = \frac{Z^4}{Z^4 + a_q}$$

где a_q для К-серии равно $a_K = 1.06 \cdot 10^6$, для L-серии $a_L = 10^8$. Таким образом эффект Оже более существенен для легких элементов ($Z < 20$), и для L-уровня коэффициенты выхода Х.И. в несколько раз меньше, чем для К-уровня.

Флуоресцентный РРМ основан на возбуждении нуклидным источником (или рентгеновской трубкой) характеристического излучения элементов, содержащихся в пробе. Характеристическое излучение (ХИ)

каждого элемента имеет строго определенную энергию, а интенсивность ХИ элемента зависит от содержания его в пробе. Анализ спектрального состава вторичного излучения пробы проводится спектрометром.

Широкое распространение, в полевой модификации с пропорциональными или сцинтилляционными детекторами, метод получил при определении элементов с порядковым номером Z более 20, т.е. начиная с кальция. Порог чувствительности определения содержания: 0.1% для элементов с $Z < 40$; 0.005% для тяжелых элементов. Верхний предел концентраций не ограничен.

При лабораторных определениях с полупроводниковыми детекторами и предварительной подготовкой проб (измельчение), порог чувствительности снижается примерно на порядок. В настоящее время, при геологоразведочных работах, применяется исключительно флуоресцентный РРМ.

Физические основы рентген-радиометрического метода (РРМ).

Основные процессы взаимодействия γ -излучения в области энергий до 100 Кэв – это фотоэффект и рассеяние.

Рассеяние γ -квантов веществом бывает двух типов: когерентное (томпсоновское) и некогерентное (комптоновское). При когерентном рассеянии энергия γ -кванта до и после взаимодействия остается постоянной. При некогерентном рассеянии энергия γ -кванта после рассеяния уменьшается, но при комптоновском рассеянии низкоэнергетического γ -излучения энергия рассеянных γ -квантов изменяется незначительно даже при больших углах рассеяния. Таким образом, при рассеянии гамма-квантов с энергией ниже 100 Кэв энергия рассеянных γ -квантов неизменна, или незначительно отличается от первоначальной.

Фотоэффект сводится к такому взаимодействию γ -кванта с одним из электронов атома, при котором γ -квант целиком поглощается атомом, а его энергия расходуется на преодоление энергии связи электрона с атомом и на кинетическую энергию электрона, в результате чего электрон покидает атом. Возникшую при этом вакансию заполняет электрон с более высокой орбиты, а разность энергий между уровнями испускается в виде характеристического излучения атома.

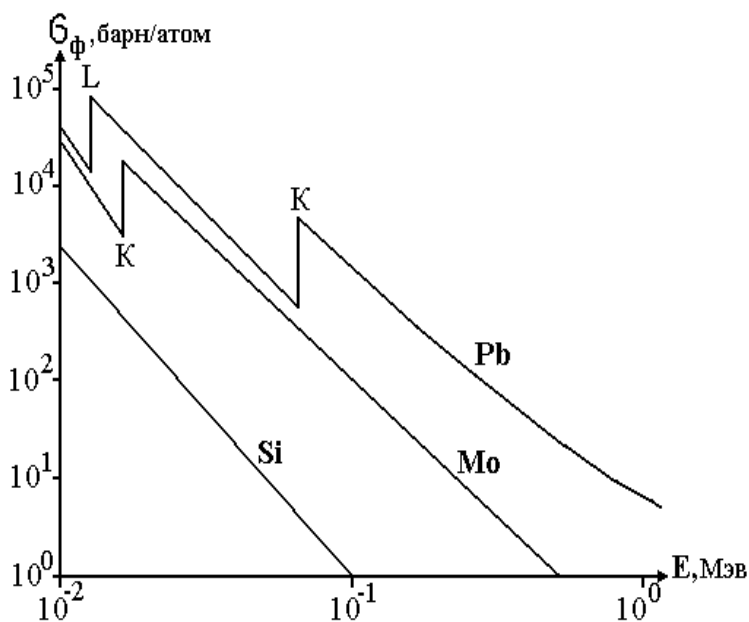


Рисунок 65. Сечение фотоэффекта для различных элементов

Фотоэффект происходит только на связанных электронах. Если E_γ больше энергии связи электрона I_K , то фотоэффект может происходить на любой электронной оболочке атома. Максимальную вероятность поглощения γ -кванта имеют наиболее сильно связанные электроны. Наблюдается резкая зависимость вероятности фотоэффекта от E_γ : $\sigma_\phi = kE_\gamma^{-n}$ где k и n – постоянные величины для данного элемента и данного интервала энергий. Для $E_\gamma < 100$ КэВ $n \approx 3$.

С уменьшением E_γ коэффициент поглощения μ возрастает, однако при E_γ равной энергии связи электрона К-уровня I_K поглощающего элемента, имеет место скачкообразное изменение коэффициента поглощения (К-скачок поглощения). Если обозначить большое значение коэффициента поглощения μ'_K при $E_\gamma > I_K$, а при $E_\gamma < I_K$ обозначить как μ''_K , то отношение

$$\mu'_K / \mu''_K = S_K$$

определяет величину скачка поглощения К-уровня. Наибольшее значение скачка поглощения отмечается у К-уровня (S_K), S_L в $1,5 \div 3$ раза меньше S_K . Для элементов с $Z < 30$ К-скачок поглощения находится в интервале от 10 до 13. С увеличением порядкового номера К-скачок уменьшается и для тяжелых элементов приблизительно равен 3 – 5.

При таких энергиях первичного излучения ($E_\gamma < 100$ КэВ) глубинность исследования невелика, даже для тяжелых элементов ($Z > 50$), у которых энергия характеристического излучения составляет десятки КэВ, глубинность будет не более 1 мм. Для более легких элементов, соответственно, глубинность будет еще меньше. Т.е. уверенно можно

говорить, что РРМ проводится в насыщенных слоях и одной из характеристик вещества будет поверхностная плотность m (г/см²).

Если исследуемую пробу, взятую в виде плоскопараллельного слоя площадью S (см²) с поверхностной плотностью m облучать потоком γ -излучения с энергией E_γ , то интенсивность потока квантов ХИ I_i на расстоянии R от пробы будет определяться выражением:

$$I = k \cdot C \cdot [(1 - e^{-\mu m}) / \mu] \quad (1)$$

где μ – массовый коэффициент поглощения вторичного (ХИ) излучения, C – концентрация определяемого элемента в исследуемой пробе, m – поверхностная плотность.

Коэффициент k определяется как $k = f(R^2, w_q, S_q, p_q, \tau_i)$, где S_q – скачок поглощения q -уровня, w_q – коэффициент выхода ХИ при возбуждении атома определяемого элемента на q -уровень, p_q – вероятность перехода атома, возбужденного на q -уровень, с излучением ХИ, τ_i – массовый коэффициент фотоэффекта.

Коэффициент k не зависит ни от концентрации определяемого элемента, ни от состава исследуемой пробы и при неизменной геометрии измерений остается постоянным. Точное аналитическое значение k рассчитать невозможно, поэтому k определяется экспериментально при градуировке.

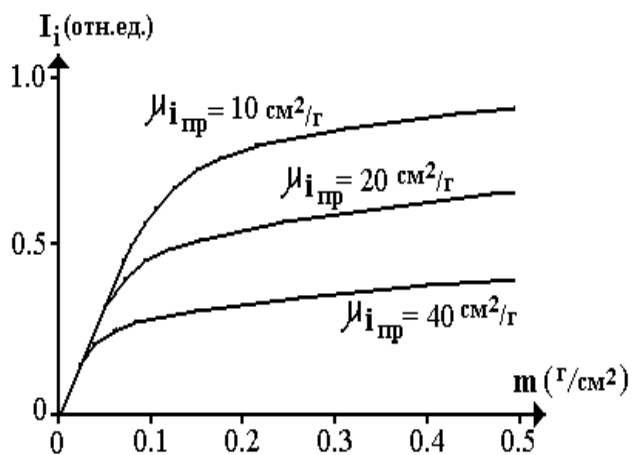


Рисунок 66. Зависимость интенсивности характеристического излучения от свойств пробы.

Параметры μ и m в какой-то мере взаимосвязаны. Породообразующие элементы (кальций, кремний, углерод, кислород) имеют малые порядковые номера ($Z < 21$), а значит и малые значения μ , которые определяются фотоэффектом. При энергиях первичного излучения более 25 КэВ, используемым в РРМ, вероятность фотоэффекта на этих элементах мала. Плотность же породообразующих минералов, по сравнению с рудными, также невелика.

Зависимость интенсивности ХИ (I) от свойств пробы ($\mu \cdot m$) имеет следующий вид:

1. При значении $\mu \cdot m < 0.5$ поглощающие свойства пробы, с точки зрения РРМ, невелики – реализуются условия измерения в промежуточном, слое. Поэтому в формуле (1) можно принять $\lim_{\mu \rightarrow 0}(e^{-\mu m}) = 1 - \mu m$ и тогда выражение (1) преобразуется $I = kCm$. Таким образом, при малых поглощающих свойствах породы (или при малых их изменениях), мы получаем линейную зависимость интенсивности ХИ. Эта ситуация реализуется в левой части графика (рис.66).
2. Для $\mu \cdot m > 5$ (насыщенный слой) $\exp(-\mu \cdot m) \ll 1$ и тогда выражение (1) преобразуется $I = kC / \mu$, что мы наблюдаем в правой части графика.

Очевидно, что интенсивность ХИ прямо пропорциональна концентрации C , однако с ростом C растут и поглощающие свойства пробы. Поэтому зависимость $I = f(C)$ не будет линейной, за исключением экзотического случая, когда с ростом C выполняется условие $\mu \cdot m < 0.5$.

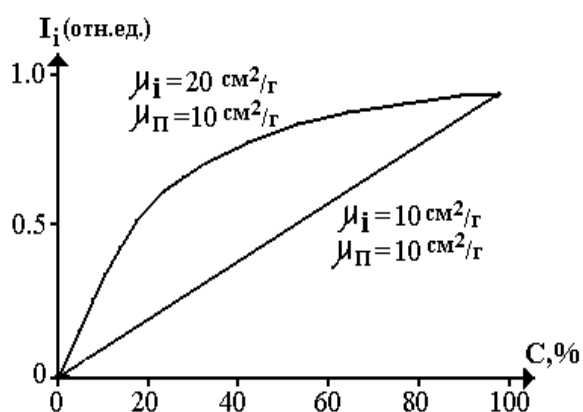


Рисунок 67. Зависимость интенсивности характеристического излучения от поглощающих свойств пробы.

Это условие может быть выполнено только в том случае, если поглощающие свойства пустой породы $\mu_{\text{п}}$ будут равны поглощающим свойствам руды $\mu_{\text{и}}$. Т.к. для пустой породы всегда выполняется условие $\mu_{\text{ипр}} \cdot m < 0.5$, то в этом случае и для рудной компоненты пробы также будут выполняться те же условия. Во всех других случаях поглощающие свойства руды выше, чем у вмещающей породы, поэтому зависимость $I_i = f(C_i)$ будет иметь вид как на предыдущем графике.

Спектр вторичного излучения состоит из следующих компонент: в области энергий близких к нулю регистрируется, в основном, аппаратный шум (крайний левый максимум). В любом спектре РРМ будет также наблюдаться пик рассеянного излучения (E_p), энергия которого будет почти совпадать с энергией источника. Как правило, по пику E_p проводят градуировку энергетической шкалы. При отсутствии в

пробе определяемого элемента ($C_i = 0\%$) между пиком рассеянного излучения и шумом значения интенсивности не равно нулю, а имеет конечное значение I_ϕ , обусловленное фоновым излучением.

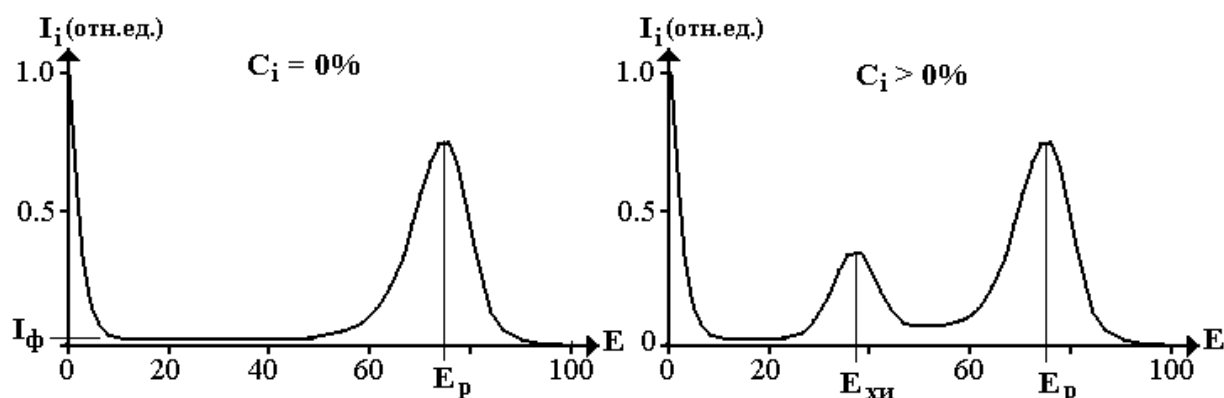


Рисунок 68. Спектр регистрируемого излучения при отсутствии и наличии определяемого элемента.

При наличии в пробе определяемого элемента ($C_i > 0\%$) появляется пик характеристического излучения с энергией E_{χ} . Зная энергию E_p , определяют энергию E_{χ} , тем самым определяют элемент. Интенсивность пика характеристического излучения пропорциональна содержанию этого элемента.

Устройство анализатора Turbo S1

Рентгенофлуоресцентный анализатор Bruker TURBO S1 производства компании Bruker AXS применяется для химического анализа различных материалов и образцов горных пород. Принцип действия анализатора

TURBO S1 основан на технологии энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии (ЭД-РФА). В качестве источника возбуждения используется рентгеновская трубка. Прибор оснащен кремнивым дрейфовым детектором (SDD) высокого разрешения с термоэлектрическим охлаждением Пельтье.

Прибор TURBO S1 является переносным портативным анализатором со встроенным портативным компьютером (КПК, см. рисунок 69). Отсоединяемый портативный компьютер обеспечивает пользовательский интерфейс для управления прибором, в котором используется аналитическая программа Bruker SI. Программа позволяет выбирать аналитические режимы, просматривать спектры и сохранять полученные

данные. КПК оснащен цветным сенсорным экраном и позволяет управлять кончиком пальца или пером (стилусом).



Рисунок 69. Внешний вид анализатора TURBO S1

В анализаторе S1 TURBOSD находится внутренний механизм сменных фильтров, который размещает фильтры на пути первичного рентгеновского излучения. Выбор определенного фильтра выполняется полностью автоматически и зависит от аналитического метода измерения, выбранного в программе Bruker S1. При смене метода можно услышать характерный звук поворота механизма сменных фильтров внутри прибора. Характерный звук поворота механизма также можно услышать при включении анализатора. Это указывает на правильную работу анализатора.

Радиационная безопасность при работе с прибором

Рентгеновская трубка и источник высокого напряжения закрыты в заполненным газом объеме. Рентгеновская трубка экранирована специальными защитными материалами, для минимизации рассеянного рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение анализатора TURBO S1 коллимируется апертурой, которая имеет диаметр приблизительно 3,5 мм. Апертура является частью конструкции коллиматора. Профили радиационного излучения, представленные на рисунке 70, демонстрируют

снижение конструкцией и защитными материалами прибора интенсивности рентгеновского излучения до безопасного уровня.

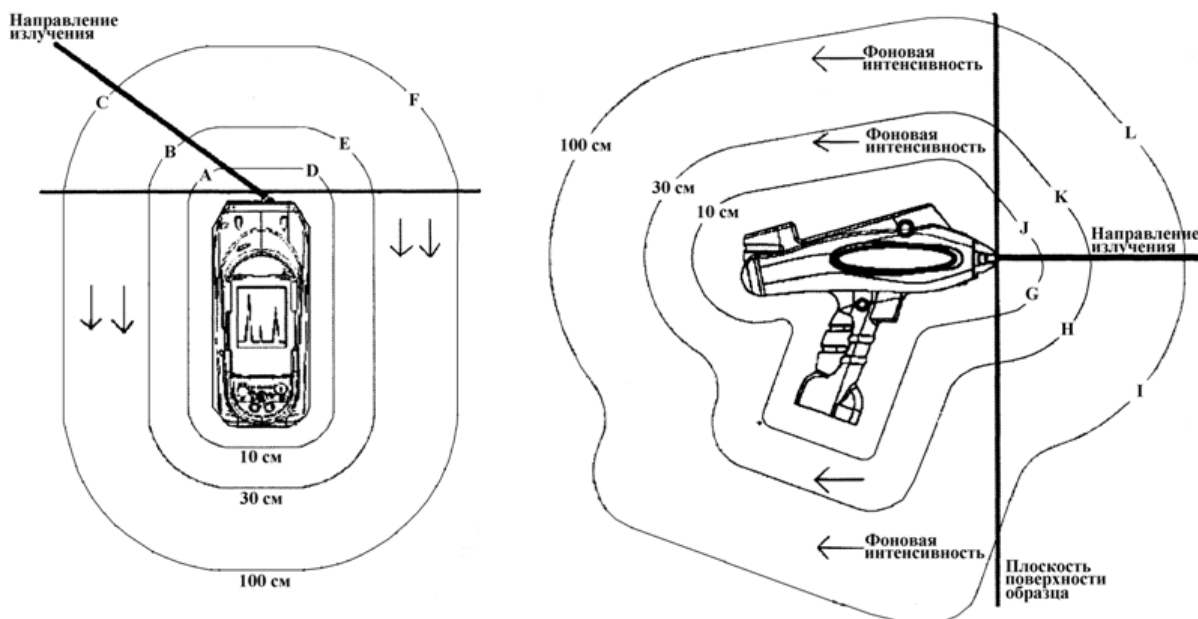


Рисунок 70. Профиль радиационного излучения, вид сверху и вид сбоку. Напряжение на рентгеновской трубке 40 кВ, ток - 10 мкА. Стрелками показаны начала участков с фоновыми значениями.

Таблица 5

	мкбэр/ч		мкбэр/ч		мкбэр/ч		мкбэр/ч
A	2	D	2	G	1	J	1
B	фон	E	фон	H	фон	K	фон
C	фон	F	фон	I	Фон	L	фон

Во всех направлениях от анализатора значения мощности дозы облучения при обычном режиме работы прибора находится на уровне фоновых значений.

В систему безопасности анализатора входят снабженный ключом выключатель, защита паролем, две контрольные индикаторные лампы, спусковой курок для генерации рентгеновского излучения, инфракрасный датчик расстояния для проверки присутствия исследуемого образца, датчик автоматического выключения прибора при низкой скорости счета (число детектируемых импульсов в секунду).

Основные функции каждого компонента системы безопасности:

главный выключатель - используется для контроля питания всех компонентов прибора.

защита паролем - для работы прибора и генерации рентгеновского излучения, необходимо запустить программу Bruker S1 на КПК, поставляемом в комплекте с прибором (КПК должен быть подключен к анализатору). Перед запуском программы Bruker S1 программа потребует пароль, для запуска прибора. Без ввода правильного пароля невозможна генерация излучения.

предупреждение о радиационной опасности - после ввода пароля, программное обеспечение КПК отображает черно-желтый символ радиационной опасности и предупреждающий сопроводительный текст в течение 15 секунд. Во время отображения символа радиационной опасности, ввод информации в компьютер невозможен;

желтая индикаторная лампа - после поворота ключа главного выключателя в положение «включено», загорается желтая индикаторная лампа, сигнализирующая о включении анализатора. Для увеличения надежности в лампу встроены дублирующие светодиоды.

Если микропроцессоры внутри прибора зафиксированы сбой в работе анализатора, желтая лампа ярко загорится, предупреждая оператора об опасности. При выходе из строя хотя бы одного светодиодного сегмента встроенного в лампу генерация излучения прекращается.

При правильном использовании прибора TURBO S1 рентгеновское излучение анализатора не представляет потенциальной опасности для персонала и находящихся рядом людей или объектов.

Безопасное использование любого рентгенофлуоресцентного прибора основано на следующих принципах:

время - минимизируйте количество времени, в течение которого анализатор генерирует рентгеновские лучи;

дистанция - следите за тем, чтобы все части тела пользователя находились как можно дальше от носовой части прибора, из которого выходит рентгеновское излучение. Не направляйте излучение, выходящее из прибора, на находящихся рядом людей, следите, чтобы люди не находились рядом с анализатором во время измерения;

защита - удостоверьтесь, что анализатор S1 TURBOSD не имеет механических повреждений. Используйте защитный экран для образца при анализе небольших и неизвестных образцов.

При правильном обращении доза облучения, полученная от анализатора, является минимальной и не представляет опасности для здоровья и жизни персонала и окружающих людей.

Помните, что прибор генерирует рентгеновское излучение, когда светится красная лампа. Не допускайте попадания какой-либо части тела (особенно глаз и рук) в зону рядом с рентгеновским излучением во время измерения

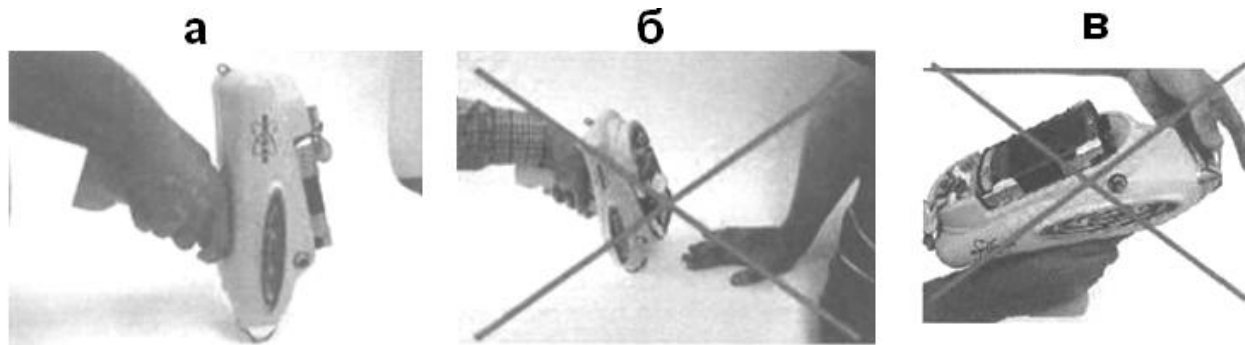


Рисунок 71. Правильное (а) и не правильное (б, в) расположение анализатора

При проведении измерений располагайте анализатор таким образом, чтобы его носовая часть была плотно прижата к образцу. Следите за тем, чтобы исследуемый образец полностью закрывал апертуру прибора и ИК-датчик. Соблюдайте безопасную дистанцию от носовой части анализатора во время генерации рентгеновского излучения.

Таблица 6

Пластина алюминия		Пластина железа	
Толщина, мм	Относительная интенсивность излучения, %	Толщина, мм	Относительная интенсивность излучения, %
0	100	0	100
1	46	1	23
2	26	2	9
3	16	3	4
4	11	4	2,1
5	7,5	5	1,1
10	1,5	10	0,08

С менее очевидным риском дополнительного облучения приходится сталкиваться при анализе тонких образцов. Излучение, выходящее из

рентгеновской трубки, имеет большую энергию, достаточную для проникновения сквозь тонкие образцы, особенно в случае, когда образец содержит «легкие» элементы (с низкой атомной массой). В таблице 6 указаны значения относительной интенсивности излучения, прошедшего через алюминиевые/железные листы различной толщины (рабочее напряжение трубки 40 кВ). При анализе тонких образцов рекомендуется пользоваться защитным экраном.

Основные компоненты анализатора TURBO S1.



Рисунок 72. Профиль анализатора Turbo S1

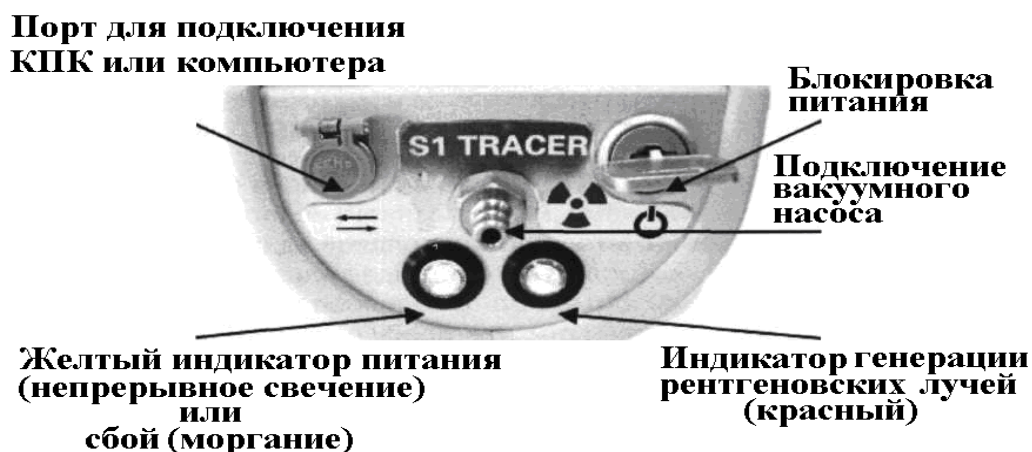


Рисунок 73. Панель управления анализатора



Рисунок 74. KPK iPAQ

Запуск анализатора, выбор режимов измерения

Не запускайте программу BrukerSI, пока анализатор TURBO S1 не будет готов к работе, т.к. программа Bruker SI будет пытаться установить связь с прибором.

В нормальном режиме работы для включения анализатора необходимо выполнить следующие действия:

1. Выньте перо из KPK.
2. Подключите KPK к анализатору TURBO S1. Установите KPK в лоток анализатора. Не прилагайте чрезмерных усилий при установке KPK. Это может повредить разъем для KPK в основании лотка и вывести из строя анализатор.
3. Нажмите кнопку главного выключателя. В случае исправного состояния прибора загорится желтая индикаторная лампа. Подождите одну минуту, пока работа термоэлектрического охладителя и рентгеновской трубки не стабилизируется. В это время будет слышен характерный звук вращающегося механизма сменных фильтров, что указывает на нормальную работу прибора.
4. Включите питание KPK кнопкой в верхней правой части KPK.

Управление анализатором осуществляется при помощи программы Bruker SI. Запуск программы осуществляется при помощи меню Start (Старт) KPK анализатора. Для осуществления различных манипуляций на

экране КПК компания Bruker рекомендует использовать перо, поставляемое в комплекте с КПК iPAQ. Использование любых других предметов, кроме предложенного пера может привести к неисправности КПК и прекращения действия гарантии.

Для запуска программы BrukerSI выполните следующие действия (рис.75):

1. Щелкните иконку «Start» («Старт») в левом верхнем углу экрана.
2. В появившемся контекстном меню выберите «BrukerSI». Загрузка программы займет несколько секунд.

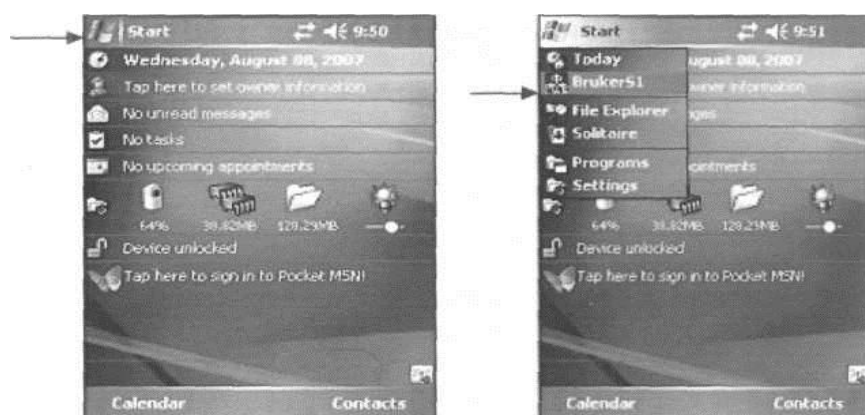


Рисунок 75. Запуск программы Bruker SI

Во время запуска программы BrukerSI появится панель авторизации, как показано на рисунке 76.



Рисунок 76. Главный экран

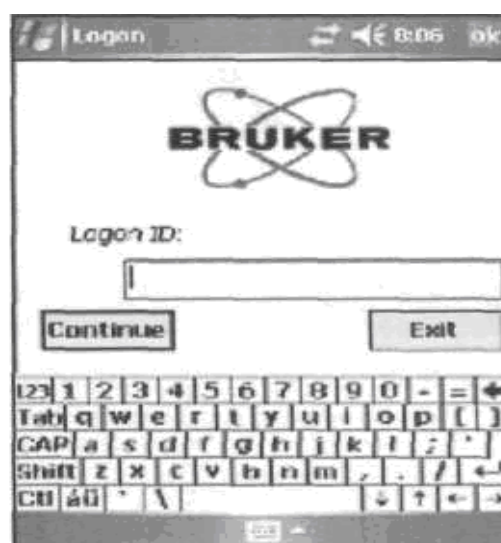


Рисунок 77. Экран авторизации

После нажатия кнопки «Login» («Авторизация») программа запросит (см. рис.77) ваш персональный пароль, без ввода правильного значения которого будет невозможна дальнейшая работа с прибором. После ввода пароля нажмите кнопку «Continue». («Продолжить»).

В случае ввода правильного пароля, появится предупреждающая надпись о том, что прибор является источником ионизирующего излучения (см. рис.78) и предназначен для использования только прошедшим обучение и допущенным к работе персоналом. Это предупреждение будет отображаться на экране приблизительно в течение 15 секунд.

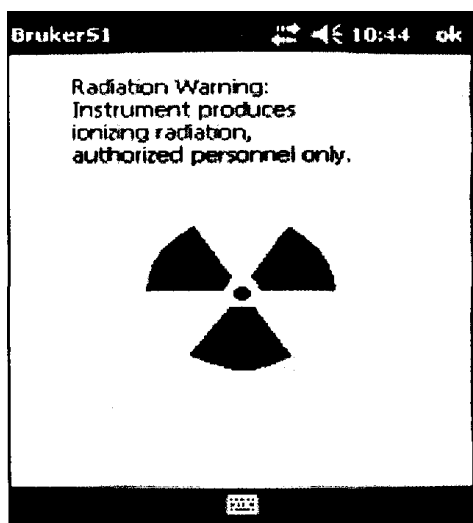


Рисунок 78. Экран предупреждения о радиации

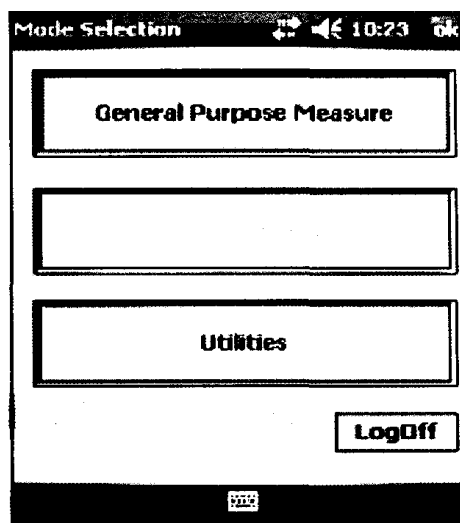


Рисунок 79. Главный экран выбора режима работы

В это время оператор не может выполнять каких-либо действий и необходимо дождаться появления на экране меню «Режима работы» (Mode Selection) анализатора, как показано на рисунке 79.

После запуска программы BrukerSI и успешного завершения авторизации на КПК в появившемся меню «Выбор режима работы» (Mode Selection, рис.79), нажмите кнопку «Проведение измерений» (General Purpose Measure) для начала измерения. После этого будет слышен характерный звук вращающегося механизма сменных фильтров. На дисплее появится экран выбора режима измерений Mode Selection Emp (Проведение измерений) (см. рис.80).

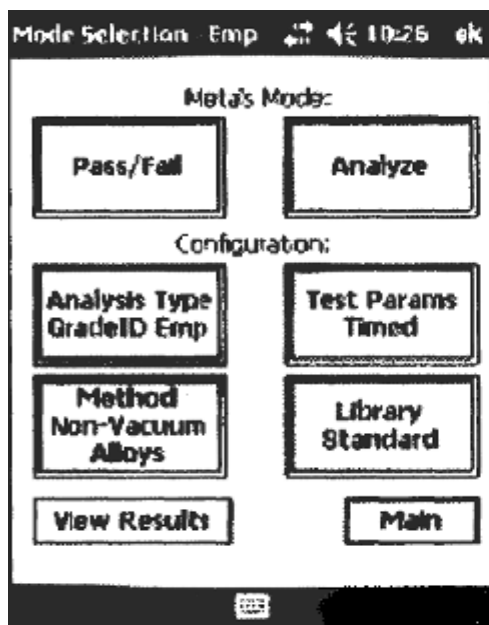


Рисунок 80. Меню Проведение анализа

измерений

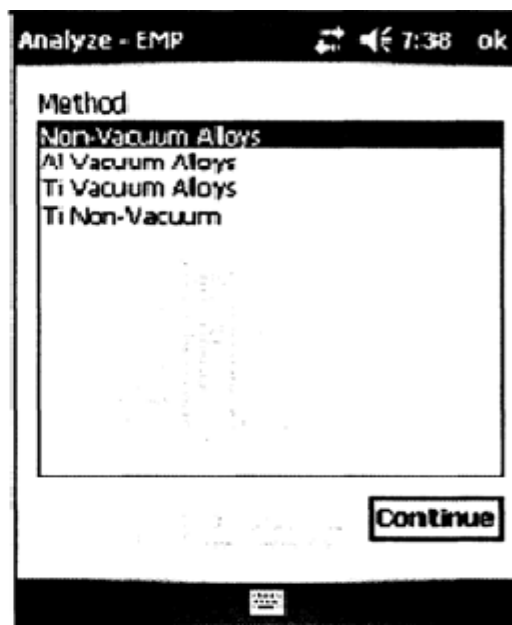


Рисунок 81. Меню Метод

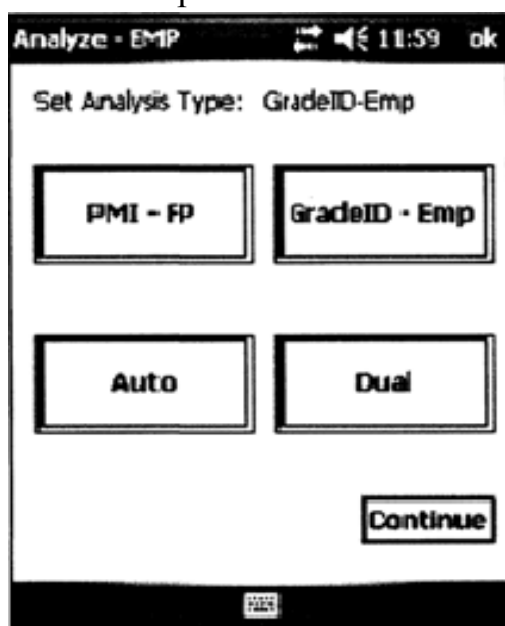


Рисунок 82. Экран выбора типа анализа

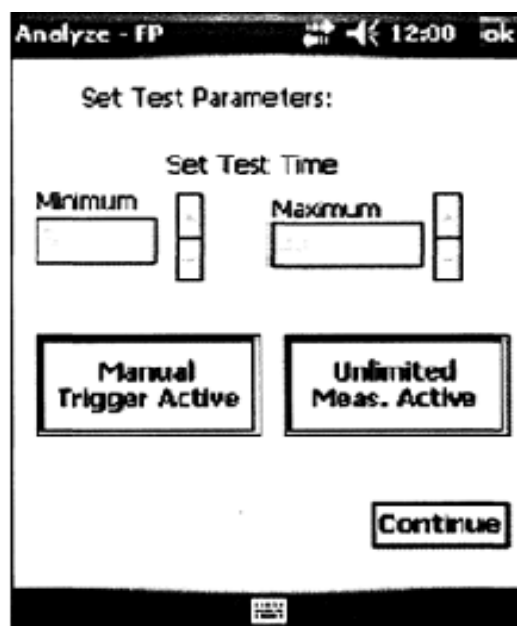


Рисунок 83. Экран выбора параметров измерения

В этом меню необходимо:

1. Выбрать тип анализа «Analysis Type» («Тип анализа»)
2. Установить минимальное и максимальное время измерения «Test Params Timed» («Установка временных параметров»)
3. Выбрать метод анализа «Method» («Метод»)

1. Analysis Type (Тип анализа) (рис.82).

Прибор S1 TURBOSD может быть настроен на анализ материала по одному из четырех Analysis Types (Типов анализа). Сделайте выбор и щелкните «Continue» («Продолжить»), чтобы сохранить ваши настройки в этом меню.

Positive Material Identification - Fundamental Parameters, PMI-FP (точная идентификация материала - фундаментальные параметры) служит для точного подсчета количеств и концентрации каждого элемента. Обычно метод фундаментальных параметров следует выбирать, если общий тип анализируемого материала неизвестен. С помощью метода фундаментальных параметров можно анализировать широкий диапазон материалов.

Grade Identification - Empirical, GradeID-Emp (Идентификация марки сплава -эмпирический метод) используется при подсчете концентраций элементов на основе эмпирической калибровки и анализирует точные количества каждого элемента. Метод обычно используется, если тип анализируемого материала известен (например, стальной сплав, медный сплав, и т.д.). При помощи Empirical (Эмпирического) метода анализ проводится быстрее, чем с помощью метода фундаментальных параметров, и аналитические результаты часто получаются более точными.

Auto (Авто) - режим который автоматически переключается из режима Empirical (Эмпирического) анализа в режим Fundamental Parameters (Фундаментальных параметров), если Grade ID (Марка сплава) не может быть определена в течение пяти секунд.

Dual (Двойной) - режим будет доступен в более поздних версиях программного обеспечения BrukerSI.

Используйте метод фундаментальных параметров (Fundamental Parameters, ФП). Щелкните «Continue» («Продолжить»), чтобы сохранить настройки этого меню.

2. Test Parameters (параметры измерения) (рис.83) позволяет пользователю регулировать время анализа и активировать или деактивировать автоматический спуск курка.

Для переключения между режимами Manual (Ручной) и Auto (Автоматический) курок, нажмите кнопку «Trigger Active» («Активировать курок»). Режим Manual (Ручной) предполагает, что курок нужно держать нажатым во время всего измерения; режим Auto (Автоматический) предполагает, что достаточно один раз нажать курок,

чтобы начать анализ. В соответствии с постановлениями местных правовых органов, применение режима Auto Trigger (Автоматический курок) запрещено в некоторых странах.

Для выбора между режимами Timed Measurement (Ограниченное по времени измерение) и Unlimited Measurement (Неограниченное по времени измерение), нажмите кнопку «Measurement Active». В режиме Timed Measurement (Ограниченное по времени измерение) в блоках «Minimum» («Минимум») и «Maximum» («Максимум») отображаются нижний и верхний пределы каждого измерения. Значение «Minimum» («Минимум») обозначает минимальное количество секунд, в течение которых должно пройти измерение, чтобы результаты сохранились. Это помогает предотвратить сохранение ненужных результатов, если курок будет нажат случайно. Значение «Maximum» («Максимум») обозначает максимальное количество секунд, в течение которых длится одно измерение. Эти значения могут быть отрегулированы нажатием стрелочек вверх и вниз в каждом блоке. Также их можно ввести с клавиатуры или набрать, щелкнув иконку клавиатуры в нижней части экрана.

В режиме Unlimited Measurement (Неограниченное по времени измерение) числа в блоках «Minimum» («Минимум») и «Maximum» («Максимум») затенены и не могут быть изменены. В этом режиме время измерения определяется временем удержания курка.

Выбрать: Timed Measurement (Ограниченное по времени измерение), минимальное время – 10 секунд, максимальное время – 50 секунд, режим Auto Trigger (Автоматический курок).

Щелкните «Continue» («Продолжить»), чтобы сохранить настройки этого меню.

3. Method (метод) (рис.81) можно изменить для получения более точных результатов путем оптимизации параметров настройки прибора для определенных типов сплавов.

Параметры Method (Метода) устанавливают различное напряжение, силу тока и параметры фильтра анализатора S1 TURBOSD, оптимизированные для проведения наиболее точных измерений и химического расчета различных типов пород, входящих в используемую библиотеку.

В меню Method (Метод) имеется шесть различных пунктов меню.

Выбрать «Анализ легких элементов». Щелкните интересующий пункт и выберите «Continue» («Продолжить»). Последует небольшая пауза, после которой будет слышен звук вращающегося механизма фильтров.

После выполнения этих трех пунктов возвращаетесь в меню «Проведение измерений» (рис.80). Анализатор к работе готов.

Подготовка образца

Прибор анализирует поверхность образца на небольшой глубине, поэтому измерения окажутся более точными, если материал будет однородным, т.е. химический состав будет одинаковым во всем объеме образца.

Если образец плоский и чистый (отсутствует ржавчина, масло, грязь, краска или другое покрытие, и т.д.) дополнительная подготовка образца не требуется.

Загрязнение поверхности особенно сильно влияет на анализ более легких элементов. Пыль, грязь и масло можно легко удалить с поверхности с помощью тряпки или мягкой щетки. Ржавчину, следы коррозии, краску и другие покрытия следует удалить шлифованием поверхности образца абразивной шкуркой или наждачным инструментом.

Во время анализа сплавов, в основе которых лежат легкие элементы, особенно алюминий, будьте внимательны при выборе материала для чистки поверхности. Абразивы, основанные на кремнии, использующие «пескоструйную» обработку и «дробеструйную» обработку, а также абразивы, основанные на алюминиевых оксидах, использующиеся в наждачных шкурках и шлифовальных кругах, могут оставлять следы этих материалов на поверхности или даже вкрапляться внутри образца. Эти следы могут повлиять на точность измеряемых концентраций.

Проведение измерения

При нажатом курке генерируется рентгеновское излучение высокой интенсивности. Остерегайтесь близкого контакта глаз и других частей тела с наконечником анализатора.

Перед началом работы анализатору требуется прогрев в течение 1 минуты после включения. Это позволяет инициализировать внутренний микропроцессор анализатора TURBO S1, стабилизировать термоэлектрический охладитель и рентгеновскую трубку. Когда

анализатор будет готов, Вы услышите характерный звук работы поворотного механизма сменных фильтров.

Убедитесь, что инфракрасный датчик на наконечнике анализатора закрыт материалом, иначе измерение не будет проведено. Инфракрасный датчик безопасности на наконечнике анализатора детектирует свет, отраженный от поверхности материала. Кроме того, элемент обеспечения безопасности, действующий на принципе регистрации обратного рассеяния, останавливает генерацию рентгеновского излучения, когда детектор не обнаруживает объект перед наконечником. Эти элементы обеспечения безопасности объединены для предотвращения случайного облучения рентгеновским излучением.

Перед началом анализа убедитесь, что запущена программа BrukerSI (в меню Анализа, рис.84), затем поместите наконечник анализатора TURBO S1 на материал и нажмите кратковременно курок.

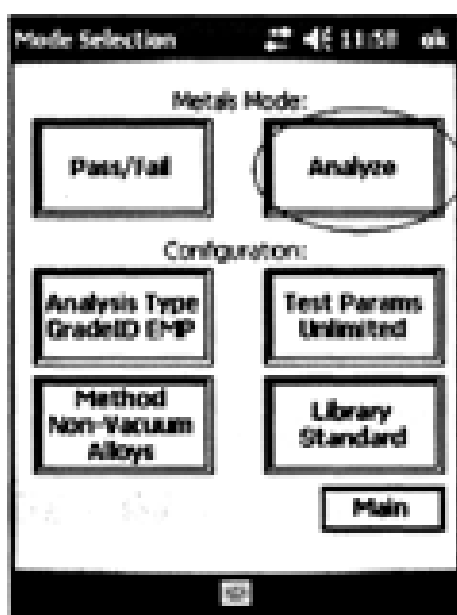


Рисунок 84. Режим анализа

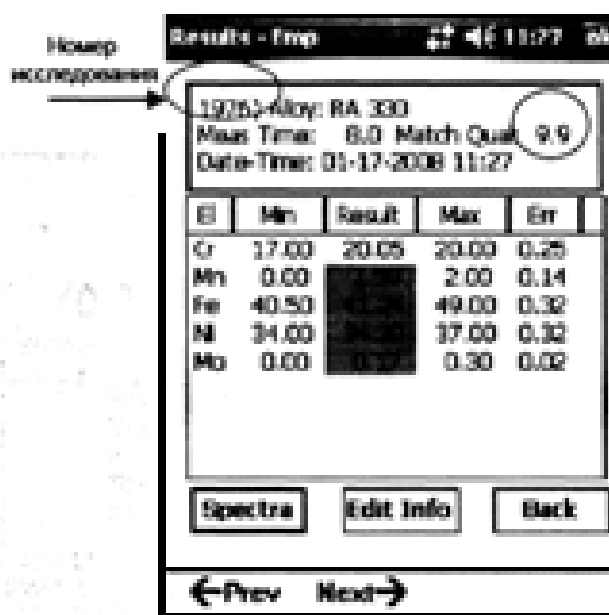


Рисунок 85. Пример окна в режиме результата анализа

Через несколько секунд после нажатия курка, анализатор показывает на экране КПК первые расчетные результаты химического состава. Результаты непрерывно обновляются в течение всего времени измерения, а время измерения отображается на экране КПК в окне результатов. После завершения измерения, следующее измерение можно начать нажатием курка.

После проведения измерения в режиме Analyze (Анализ), на экране появляются окончательные результаты измерения (рис. 85). Чтобы

перейти к просмотру спектра, необходимо нажать кнопку Spectra («Спектры») внизу экрана. Для возврата к окну результатов нажмите кнопку Results («Результаты»).

Выводом спектров на экран можно управлять, перемещая перо по экрану. Перемещение пера вверх и вниз увеличивает и уменьшает масштаб оси y (скорость счета). Перемещение пера влево и вправо изменяет масштаб оси x (кэВ).

Также можно управлять спектрами через контекстное меню спектров. Для вызова контекстного меню спектров нажмите и удерживайте перо в любой части окна вывода спектров (окно внизу справа на рис. 86). В данном меню доступны следующие опции:

X + : Уменьшает ось x (кэВ) для приближения спектра.

X - : Увеличивает ось x (кэВ) для удаления спектра.

XO : Повторно центрирует и возвращает исходный масштаб оси x.

Cent : Повторно центрирует спектр по обеим осям.

Y + : Растягивает ось y (скорость счета).

Y - : Сжимает ось y (скорость счета).

Y0 : Возвращает спектр в исходный масштаб по оси y.

Def.: Восстанавливает настройки спектра по умолчанию; спектр повторно центрируется, восстанавливается масштаб по обеим осям.

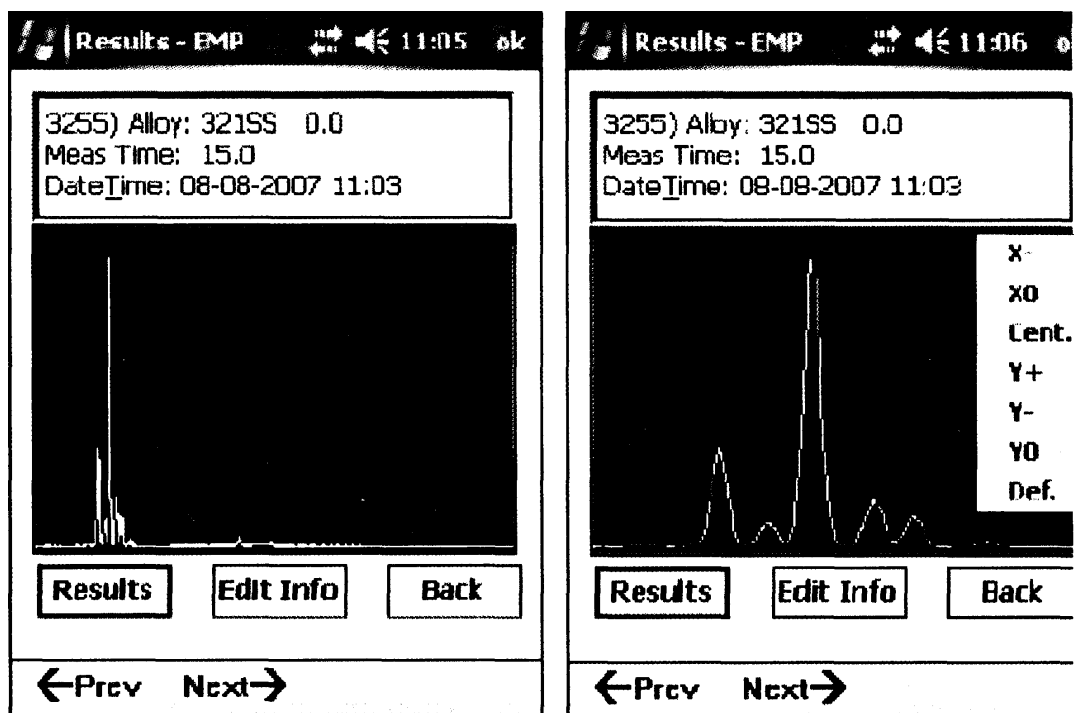


Рисунок 86. Примеры окна спектров. Показано меню осей спектров.

Чтобы выделить спектральные максимумы, нажмите в любой части экрана, чтобы отметить интересующую Вас область двумя красными вертикальными линиями. Эти линии соответствуют энергиям спектра каждого элемента.

Чтобы определить, какие спектральные линии относятся к отдельному элементу, нажмите кнопку Results для возврата на страницу результатов. Отметьте интересующий Вас элемент, нажав на его название. Для возврата к спектрам нажмите кнопку Spectra. Спектральные линии, относящиеся к интересующему Вас элементу, будут выделены двумя красными линиями (линии энергии K и L).

Выключение анализатора. Нажмите кнопку Back в окне результатов «Analyze». Нажмите кнопку Main («Главная») в окне «General Purpose Measure» («Проведение измерений»), а затем LogOff («Выход») для возврата к окну Login («Вход в систему»). Нажмите кнопку Exit («Выход») для выхода из программы BrukerSI. Выключите КПК.

Переведите выключатель анализатора TURBO S1 «OFF».

Задание по лабораторной работе

1. Изучит физические основы метода. Ответить на контрольные вопросы.
2. Изучить устройство анализатора TURBO S1, основы безопасной работы с ним.
3. Освоить порядок проведения работ с анализатором (выборы режимов измерения, проведение измерения, результаты измерения).
4. **Только после выполнения первых трех пунктов преподаватель дает разрешение на работу с анализатором!**
5. Провести измерение образцов, результаты измерения предоставить в письменном в виде таблицы, где по каждой пробе представлены сведения об элементах в пробе, их содержании и погрешностях определения.
6. На одном из полученных спектров идентифицировать пики.

Контрольные вопросы

1. Как зависит сечение фотоэффекта от энергии гамма-кванта и от Z вещества?
2. Механизм возникновения характеристического излучения?

3. По какой серии характеристического излучения результаты более достоверны? Почему?
4. Каким образом можно раздельно вести анализ по легким и по тяжелым элементам?
5. Почему в современных приборах в качестве детектора используется полупроводниковый детектор?
6. Почему в современных анализаторах для возбуждения характеристического излучения используется рентгеновская трубка, а не изотопный источник?
7. Почему анализ вещества в данном методе происходит в очень тонком слое?

Литература

1. Мейер В.А., Ваганов П.А., Пшеничный Г.А. Методы ядерной геофизики / Учебник для ВУЗов – Л.: Изд-во ЛГУ, 1988 – 376 с
2. Якубович Л.А., Зайцев Е.М., Пржиялговский С.М. Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. М.: Энергоатомиздат, 1982–264 с.
3. Портативный рентгенофлуоресцентный анализатор Turbo S1. Руководство пользователя/Bruker AXS Handheld Inc, 2011, 101 с.